

30-0190/001

O. PROF. DR.-ING. DR.-ING. E.H. KARL KORDINA
INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

"VERSUCHE ZUR ERMITTLUNG VON SCHALUNGSDRUCK
UND SCHALUNGSREIBUNG IM GLEITBAU"

A B S C H L U S S B E R I C H T

ZUM FORSCHUNGSVORHABEN
AIF 6464 (DBV-Nr. 107)

B I B L I O T H E K
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

BERICHT ERSTATTET VON

O. PROF. DR.-ING. K. KORDINA
DR.-ING. S. DROESE

JUNI 1987

GEFÖRDERT VON DER ARBEITSGEMEINSCHAFT
INDUSTRIELLER FORSCHUNGSVEREINIGUNGEN

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seiten</u>
Vorwort	III
Zusammenfassung	IV
Liste der verwendeten Bezeichnungen . . .	VI
Materialbezeichnungen/Schalungsmaterialien	VIII
1. Allgemeines	1
2. Literaturangaben zu Schalungsdruck und Schalungsreibung bei Gleit- bauten	3
2.1 Schalungsdruck des Betons bei Gleitbauten	3
2.1.1 Besonderheiten des Gleitbauver- fahrens	3
2.1.2 Literaturangaben zu Vorschriften und Richtlinien zur Ermittlung des Schalungsdruckes	4
2.1.3 Bisher durchgeführte Schalungs- druckmessungen	9
2.2 Schalungsreibung bei Gleitbauten .	14
2.2.1 Literaturangaben zur Schalungs- reibung	14
3. Eigene Untersuchungen	19
3.1 Versuche zur Ermittlung der Scha- lungsreibung	19
3.1.1 Versuchseinrichtung	19
3.1.2 Versuchsprogramm	24
3.1.3 Versuchsdurchführung	27
3.1.4 Feststellungen bei der Versuchs- durchführung	44
3.2 Baustellenmessungen	46

	<u>Seiten</u>
4. Auswertung der Meßergebnisse . . .	54
4.1 Auswertung der Reibungsversuche .	54
4.2 Auswertung der Baustellen- messungen	148
4.3 Schlußfolgerungen aus den eigenen Baustellenmessungen	157
5. Empfehlung zum Ansatz der Größe des Schalungsdruckes bei Gleit- schalungen	159
6. Übertragung der Ergebnisse der Reibungsversuche auf Baustellen- bedingungen	165
7. Empfehlung zum Ansatz der Größe der Schalungsreibung bei Gleit- schalungen	168
8. Notwendigkeit weiterer Forschung .	174
9. Literatur	176

Vorwort

Die nachstehend beschriebenen Untersuchungen wurden durch finanzielle Förderung der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AIF) ermöglicht; betreut wurde das Vorhaben vom Deutschen Beton-Verein (DBV). Die Mitglieder des Arbeitskreises Gleitbauverfahren des DBV, zugleich Beratergruppe des Forschungsvorhabens, die Herren

Dipl.-Ing. Drozella (Obmann), Hochtief AG,
Essen;
Obering. Kern, Wayss & Freytag AG, Frankfurt;
Prof. Dr.-Ing. Kupfer, TU München;
Dipl.-Ing. Lindner, Dyckerhoff & Widmann AG,
München;
Dipl.-Ing. Luchner, Dyckerhoff & Widmann AG,
München;
Dipl.-Ing. Manleitner, Institut für Bautechnik, Berlin;
Dipl.-Ing. Rohlf, Gleitschnellbau GmbH,
Ratingen;
Dr.-Ing. Seiler, Deutscher Beton-Verein e.V.,
Wiesbaden;
Dr.-Ing. Stöckl, TU München;
Dr.-Ing. Windels, Ingenieurbüro Windels-Timm,
Hamburg;

haben das Vorhaben durch Anregungen und Vorschläge unterstützt. Das Entgegenkommen der Firmen Strabag-Bau AG und Gleitschnellbau GmbH ermöglichte die Baustellenmessungen.

Die Verfasser danken allen Beratern und den Mitwirkenden des Forschungsvorhabens.

Zusammenfassung

Im Gleitbauverfahren können Stahlbetonbauwerke wie Schornsteine, Türme und Silos schnell, sicher, fugenlos und insgesamt wirtschaftlich erstellt werden. Um die Gleitbauausrüstung selbst leicht zu halten (was Montage und Demontage vereinfacht), vor allem jedoch Schäden infolge der Reibung der Schalung an der Oberfläche des noch jungen Betons zu vermeiden, ist es wichtig, die Schalungsreibung möglichst gering zu halten. Bisher fehlten gesicherte Erkenntnisse darüber, wie dies durch geeignete Wahl von Schalungsart, Betonzusammensetzung und Gleitgeschwindigkeit erreicht werden kann.

In 45 Versuchsreihen wurden mit einer eigens hierfür entwickelten Versuchseinrichtung mit Beton gefüllte Prüfkörper auf Oberflächen verschiedener gebräuchlicher Schalungsmaterialien bewegt und dabei die zeitliche Entwicklung der Haftreibungswerte zwischen Beton und Schalung festgestellt. Soweit es der begrenzte Versuchsumfang zuließ, wurde dabei Beton mit verschiedenen Zementen, Zuschlagstoffen, Zusatzmitteln und -stoffen verwendet.

An der Baustelle einer Siloanlage wurden während der Ausführung der Gleitarbeiten Schalungsdruck und -reibung gemessen. Die Auswertung der Schalungsdruckmessung und der Vergleich mit bisher vorliegenden Ergebnissen aus Laborversuchen zeigte, daß an der Baustelle im oberen Bereich der Schalung wesentlich höhere Betondrücke, als bisher angenommen, auftraten. Als Ursache können Zwängungen aus Schief-

stellungen der Schalung angenommen werden. Unter Berücksichtigung bisheriger und der eigenen Messungen wurde ein Vorschlag zum Ansatz des Schalungsdruckes des Betons für die Bemessung von Gleitschalungen formuliert.

Die Reibungsversuche, kalibriert durch die Baustellenmessungen und bisher vorliegende Erkenntnisse, ermöglichten die Formulierung eines mathematischen Ansatzes zur Ermittlung der Schalungsreibung in Abhängigkeit von Schalungsmaterial, Betonzusammensetzung, Temperatur und Ruhezeit der Schalung zwischen zwei Bewegungen. Damit ist erstmalig die rechnerische Vorausbestimmung der zu erwartenden Schalungsreibung bei Gleitschalungen möglich. Das Rechenverfahren ist praxisgerecht aufbereitet. Die Ergebnisse können sowohl zur Auslegung der Gleitbauausrüstung als auch zur Entscheidung darüber herangezogen werden, welche Randbedingungen (Betonzusammensetzung, Schalungsmaterial usw.) zu ändern sind, um gewünscht niedrige Schalungsreibung zu erreichen.

Auf die Notwendigkeit weiterer Forschung wurde hingewiesen.

Liste der verwendeten Bezeichnungen

A	$[m^2]$ $[cm^2]$	Fläche
A	}	Parameter zur
B		mathematischen Beschreibung
C		des zeitabhängigen
a		Anstiegs der
b		Haftreibung
a	$[m]$	Abstand der Resultierenden des Schalungsdruckes von Unterkante Gleitschalung
e		2,71828 Basis der natürlichen Logarithmen
F_H	$[kN/m]$	Resultierende Kraft aus Betondruck auf die Schalung, horizontal gerichtet
H	$[m]$	Höhe der Schalung, Betonhöhe
T	$[^{\circ} C]$	Betontemperatur
t	$[h]$	Zeit
p_b	$[kN/m]$	Betondruck auf die Schalung, horizontal gerichtet
p_{oh}	$[kN/m]$	Schalungsdruck auf oberes Kranzholz
p_{uh}	$[kN/m]$	Schalungsdruck auf unteres Kranzholz
p_v	$[kN/m]$	Schalungsreibung

v	[m/h]	Gleitgeschwindigkeit
v_b	[m/h]	Steiggeschwindigkeit des Betons in der Schalung während des Betonie- rens
w/z	-	Wasser-Zement-Wert
η		Korrekturwert zur Temperatur- kompensation
μ	[mm]	gemessene Rauhtiefe
ρ	[kN/m ³]	Rohdichte des Betons

Materialbezeichnungen

A	}	Sieblinie
B		der Betonzuschläge
C		gem. DIN 1045
HOZ		Hochofenzement
PZ		Portlandzement
K		Betonkonsistenz
PTFE		Polytetrafluoräthylen, Handelsname Teflon
V2A		rostfreies Stahlblech

Schalungsmaterialien

M	Mehrschichtenplatte
H	gehobelte Holzbretter
R	Riffelblech
S	Stahlblech

1. Allgemeines

Im Gleitbauverfahren, einem Ortbetonverfahren zur Herstellung hoher Bauwerke wie Schornsteine, Türme und Silos, können die Bauwerke schnell, sicher, fugenlos und insgesamt kostengünstig erstellt werden. Das Verfahren beruht darauf, daß ein ca. 1,20 m hoher Schalungskörper mit Frischbeton gefüllt und nach Verdichtung des Betons taktweise durch geeignete Hebeausrüstungen gehoben wird. Während oben die Schalung jeweils wieder mit Beton gefüllt wird, wird am unteren Rand der Schalung das fertige Bauteil freigegeben. Einen Querschnitt durch eine Gleitschalung mit Benennung der Teile zeigt Bild 1.

Der Frischbeton im oberen Teil der Schalung erzeugt Schalungsdruck; beim Hochziehen der Schalung ist die Schalungsreibung zwischen Beton und Schalhaut zu überwinden. Genaue Kenntnisse über die Größe des Schalungsdrucks des Betons sowie die Schalungsreibung bei Gleitbauten sind sowohl wichtig für die Auslegung der Gleitbauausrüstung selbst als auch für die Festlegung des Ablaufs der Gleitarbeiten. Hier interessiert vor allem, wie durch geeignete Wahl von Schalungsmaterial, Betonzusammensetzung und Gleitgeschwindigkeit die Schalungsreibung gering gehalten werden kann. Geringe Werte der Schalungsreibung ermöglichen nicht nur eine leichte Ausführung der Gleitbauausrüstung (dadurch wird die Montage und vor allem die Demontage der Gleitschalung vereinfacht), einen großen Abstand der Heberböcke (was das Einbauen der Bewehrung erheblich erleichtert), sondern stellen auch sicher, daß Schädigungen des Betons (Aufreißen der Betonoberfläche oder sogar Abreißen des Betons von vorher erstellten Bauabschnitten) nicht eintreten.

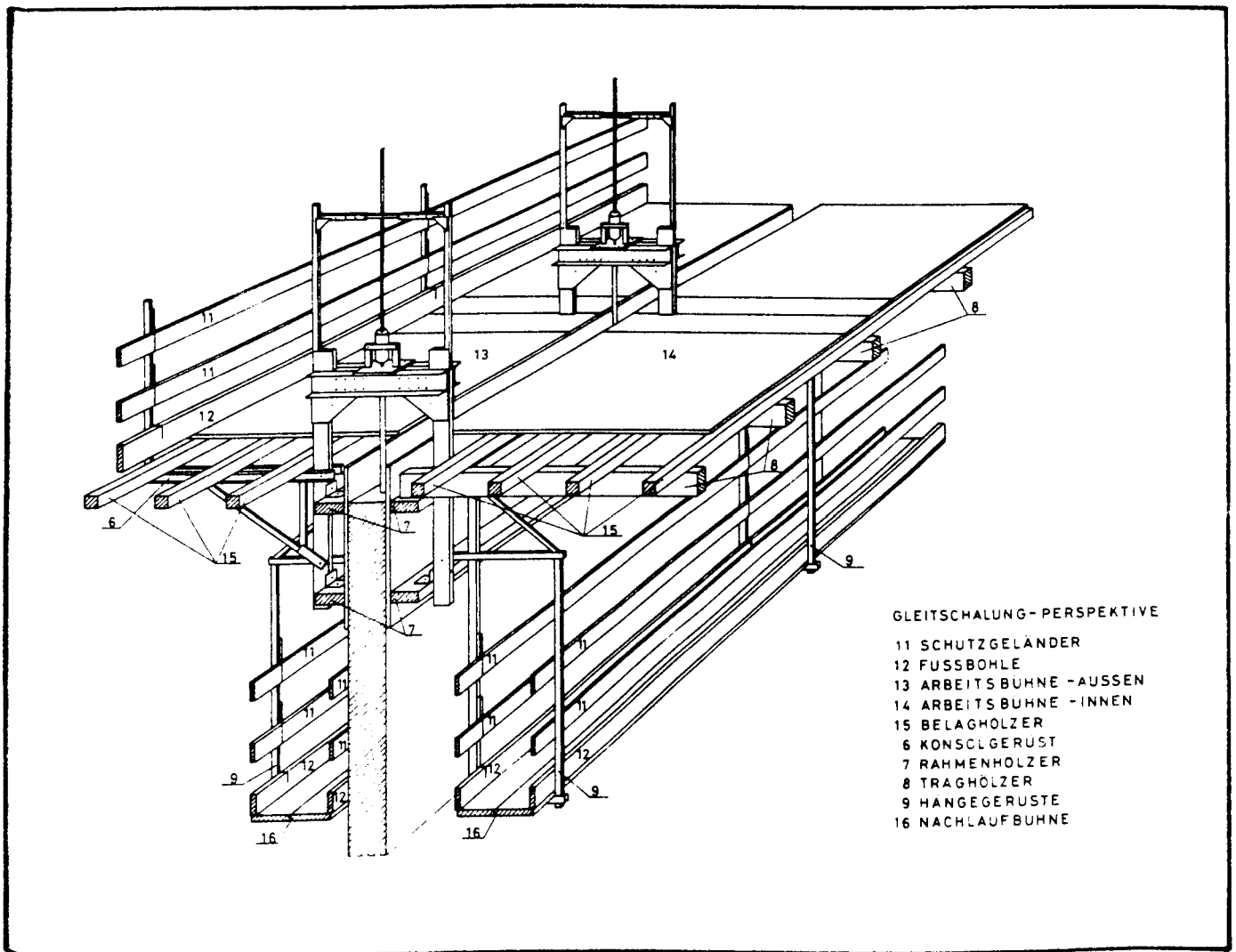


Bild 1: Gleitschalung mit Benennung der Einzelteile
(aus / 7 /)

2. Literaturangaben zu Schalungsdruck und Schalungsreibung bei Gleitbauten

2.1 Schalungsdruck des Betons bei Gleitbauten

2.1.1 Besonderheiten des Gleitbauverfahrens

Der Betoniervorgang bei Gleitbauten unterscheidet sich in wesentlichen Punkten vom Betonieren üblicher, in feststehender Schalung errichteter Bauteile. So ist

- die Steiggeschwindigkeit des Betons in der Schalung beim Gleitbauverfahren wesentlich geringer als im üblichen Ortbetonbau,
- die Eintauchtiefe des Rüttlers beim Gleiten auf die obersten Schichten des zuletzt eingebrachten Betons (auf ca. 50 cm) beschränkt und
- die Schalung in Bewegung.

Diese Besonderheiten führen zu Schalungsdrücken, die sich mit den üblichen Rechenansätzen für den Schalungsdruck - die ohnehin durch spärliche Versuche mit großer Streubreite nur wenig abgesichert sind - bisher nicht ausreichend genau erfassen lassen.

Die einzig wirklich verlässliche Aussage über den Schalungsdruck und dessen Verlauf über die Schalungshöhe ist, daß unterhalb der Schalhaut - da hier der Beton nicht mehr seitlich gestützt wird - kein Schalungsdruck mehr auftreten kann. Ausgehend von dieser Randbedingung und weiteren Annahmen sind in älteren Veröffentlichungen /1, 9/ Lastansätze für den Schalungsdruck des Be-

tons bei Gleitbauverfahren entwickelt worden. Die so ermittelten Werte haben sich jedoch inzwischen alle - teilweise auch bedingt durch Änderungen der Technologie im Gleitbau wie Verwendung größerer Ausbreitmaße des Betons, größerer Gleitgeschwindigkeiten und Verdichtung mit Rüttlern - als zu gering erwiesen. Da ein schlüssiges Modell zur Ermittlung des Schalungsdrucks, das ausreichend alle Besonderheiten des Gleitbaus erfaßt, derzeit noch fehlt, wird bisher die Schalungsausrüstung nach Erfahrungswerten dimensioniert - wobei dann der Sicherheitsbeiwert unbekannt ist - oder auf die wenigen vorliegenden Meßergebnisse zurückgegriffen.

2.1.2 Literaturangaben zu Vorschriften und Richtlinien zur Ermittlung des Schalungsdrucks

DIN 18218 "Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen" / 8 / gibt Hilfsmittel zur Ermittlung der Größe des Schalungsdrucks und zur Verteilung an. Die Festlegungen beruhen auf Auswertungen von Specht; im Erläuterungsbericht /24/ werden die Grundlagen und die benutzten Quellen angegeben. Weder die Norm noch der Erläuterungsbericht erwähnen die Gleitbauweise. Das Grunddiagramm (Bild 1 der Norm) ergibt für den Bereich der Steiggeschwindigkeiten von 0 bis 0,4 m/h (also den für den Gleitbau derzeit üblichen Geschwindigkeitsbereich) einen Frischbetondruck p_b [kN/m²] von

$$p_b = 5 \cdot v_b + 21 \quad (\text{Gl. } 1)$$

wobei die Steiggeschwindigkeit v_b in [m/h] einzu-

setzen ist. Für 0,2 m/h Gleitgeschwindigkeit errechnet sich danach der max. Schalungsdruck zu 22 kN/m^2 bei einer Frischbetontemperatur von 15°C und ohne Verwendung von Betonzusatzmitteln. Bei einer (üblichen) Schalungshöhe von 1,20 m ergibt sich dann eine Belastung nach Bild 2.

Die amerikanischen Empfehlungen /6/ ergeben bei Gleitschalungen einen Seitendruck von

$$p_{\text{Si}} = c_1 + \frac{524 R_{\text{Si}}}{T_c + 17,8} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit $c_1 = 4,79$

p_M = Seitendruck $[\text{kN/m}^2]$

R_{Si} = Steiggeschwindigkeit des Betons
[m/h]

T_c = Betontemperatur $[\text{°C}]$.

Damit ergibt sich für eine Gleitgeschwindigkeit von 0,20 m/h und 15°C Betontemperatur ein maximaler Schalungsdruck von $7,99 \text{ kN/m}^2$, für den die Teile der Gleitschalung zu bemessen sind. Die nach ACI - Standard gegenüber Standschalungen geringeren Werte des Schalungsdrucks bei Gleitschalungen begründet Hurd /12/ damit, daß nur wenig gerüttelt, der Beton lagenweise eingebracht und eine Nachverdichtung nicht ange-

wandt wird. Bei starker Verdichtung mit Innenrüttlern empfiehlt Hurd, den Schalungsdruck wie bei Wandschalungen zu bestimmen, nach ACI 347-78 dann zu

$$p_{si} = 7,2 + \frac{785 R_{si}}{T_c + 17,8}; \quad (\text{Gl. 3})$$

dies ergibt bei 0,20 m/h Gleitgeschwindigkeit und 15 ° C Betontemperatur $\max p_{si} = 11,99 \text{ kN/m}^2$ (Bild 3).

Der CIRIA-Report 108 / 4 / gibt, basierend auf der Auswertung von Baustellenmessungen, zur Ermittlung des Schalungsdrucks die Gleichung

$$P_{\max} = D [C_1 \sqrt{R} + C_2 K \sqrt{H - C_1 \sqrt{R}}] \quad (\text{Gl. 4})$$

an, mit

C_1 1,0 bei Wänden

C_2 0,3 bis 0,6 in Abhängigkeit von der Zementart und den Zusatzmitteln

D Betongewicht $[\text{kN/m}^3]$

H Schalungshöhe $[\text{m}]$

K Temperaturkoeffizient

$$K = \left(\frac{36}{T + 16} \right)^2$$

R Steiggeschwindigkeit des Betons $[\text{m/h}]$

T Betontemperatur $[\text{° C}]$

Damit wird für einen Beton mit Portlandzement, dem keine Zusatzmittel zugefügt werden, 0,20 m/h Gleitgeschwindigkeit und 15 ° C Betontemperatur ein maximaler Schalungsdruck von 19,96 kN/m² (Bild 4) ermittelt.

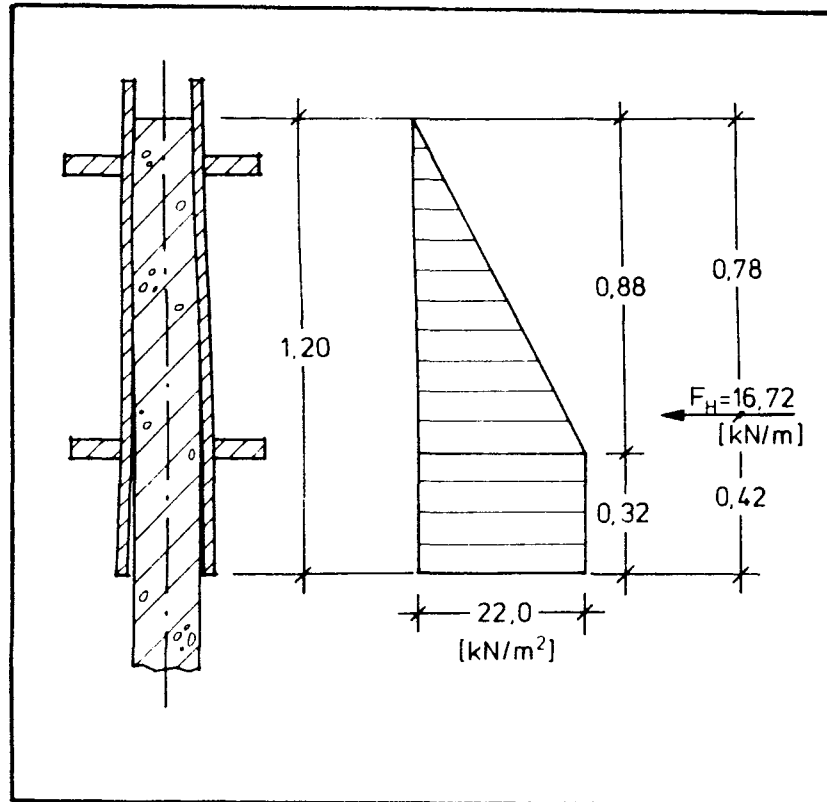


Bild 2: Schalungsdruck des Betons
nach DIN 18 218 /8/

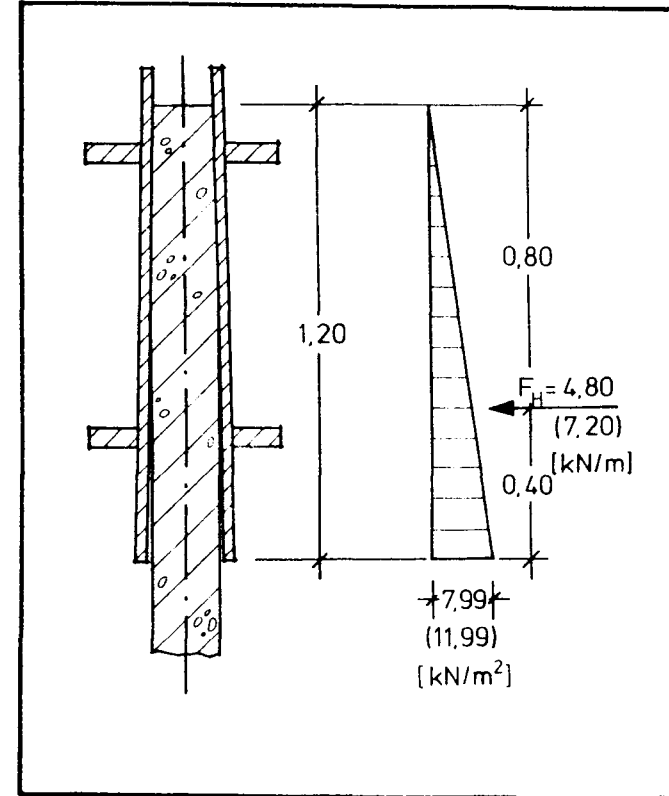


Bild 3: Schalungsdruck des Betons
nach ACI 347-78 /6, 12/

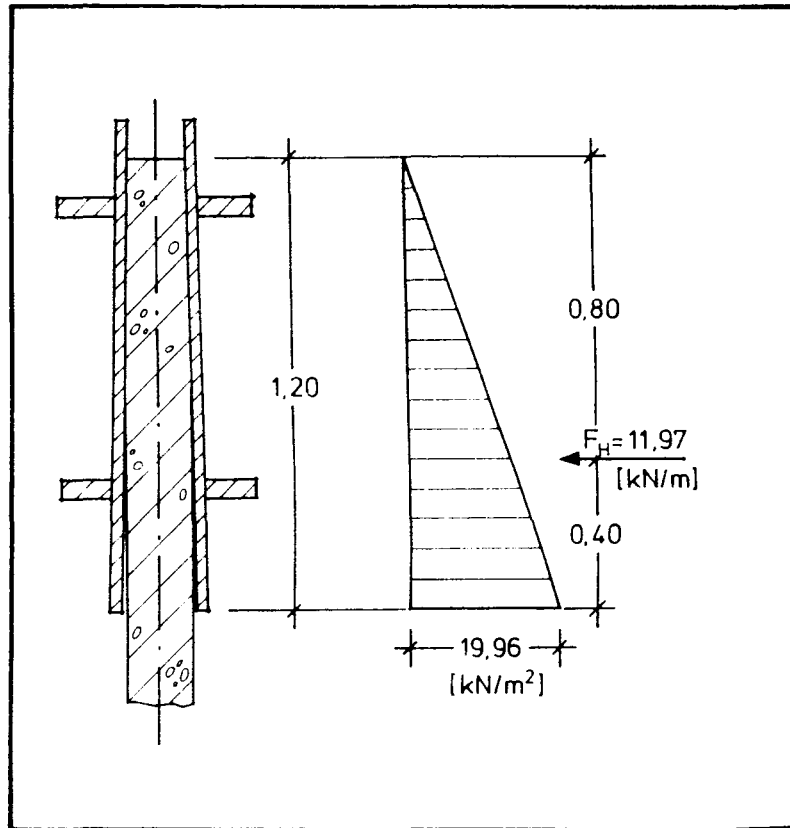


Bild 4: Schalungsdruck des Betons
nach CIRIA-Report 108 /4/

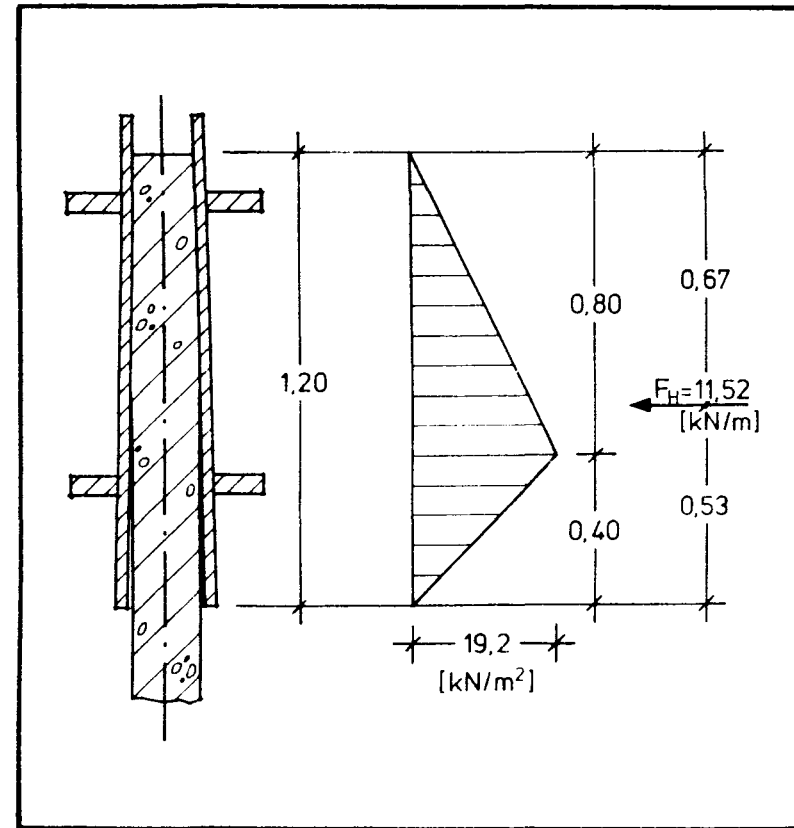


Bild 5:
Schalungsdruck des Betons nach
französischen und belgischen
Gleitbauempfehlungen /5, 21/

Die französischen Gleitbauempfehlungen /5/ setzen für den Schalungsdruck hydrostatische Druckverteilung bis zu einer Tiefe von $\frac{2}{3} \cdot H$ (jedoch $\leq 0,80$ m) an; bis Unterkante Schalhaut wird der Druck wieder linear bis auf Null abgemindert. Dieser Ansatz ergibt (bei einem anzusetzenden Betongewicht von 24 kN/m^3) für eine 1,20 m hohe Schalung einen maximalen Betondruck von $19,2 \text{ kN/m}^2$ (Bild 5).

Die belgischen Gleitbauempfehlungen /21/ geben die gleichen Werte für den Schalungsdruck wie /5/ an.

2.1.3 Bisher durchgeführte Schalungsdruckmessungen

An drei Versuchswänden mit Wandstärken von 15 bzw. 40 cm wurden von Steinecke, Prokopowicz und Bach Schalungsdruck und Schalungsreibung gemessen /25/. Die Versuchswände waren 4,0 m lang und 4,0 m hoch. Als Schalhaut kamen auf jeweils 2,0 m Wandlänge gehobelte Holzbretter bzw. eine wasserundurchlässige, oberflächenvergütete, wasserabweisende Schalung (Belasitschalplatten) zur Anwendung. Die Wände waren beidseitig horizontal und vertikal mit $\emptyset 10$ in 0,20 m Abstand bewehrt. Es kam ein plastischer Beton zur Anwendung; die Sieblinie der Zuschläge (Grobkorn 15 - 30 mm Edelsplitt) entsprach etwa der Sieblinie B 32 der DIN 1045; der Zement war ein PZ 375. Die Versuche wurden in einer Halle bei einer Temperatur von 14°C (Wanddicke 0,40 m) bzw. $19 - 20^\circ \text{C}$ (Wanddicken 0,15 m) durchgeführt; die Gleitgeschwindigkeiten betrugen 0,10 bzw. 0,40 m/h; die Schalhaut war 1,20 m hoch.

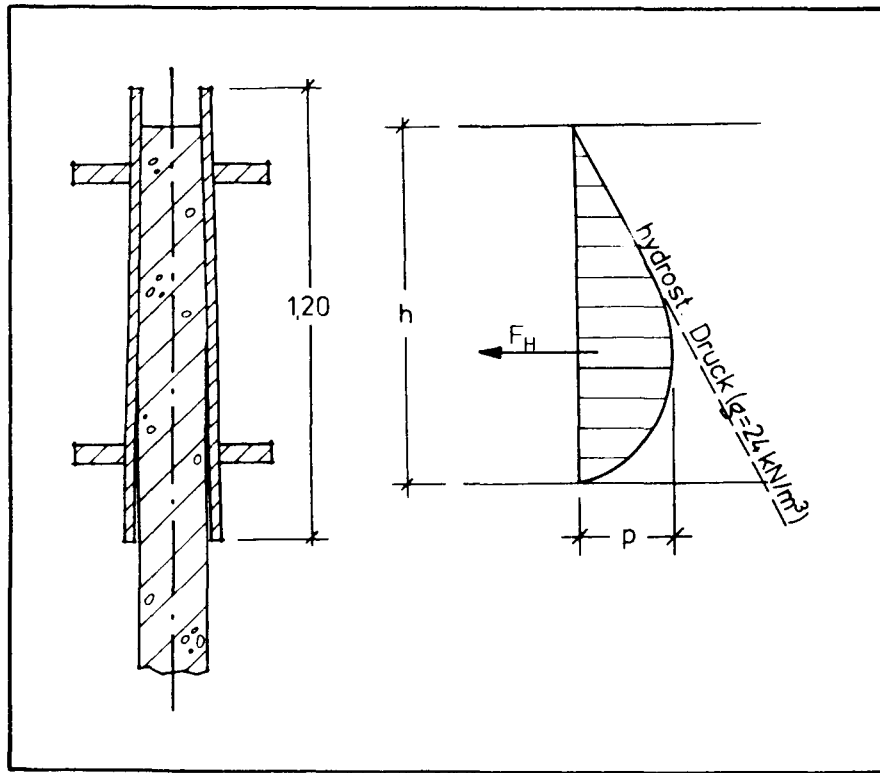


Bild 6: Schalungsdruck des Betons
nach Messungen von Steinecke,
Prokopowicz und Bach /25/

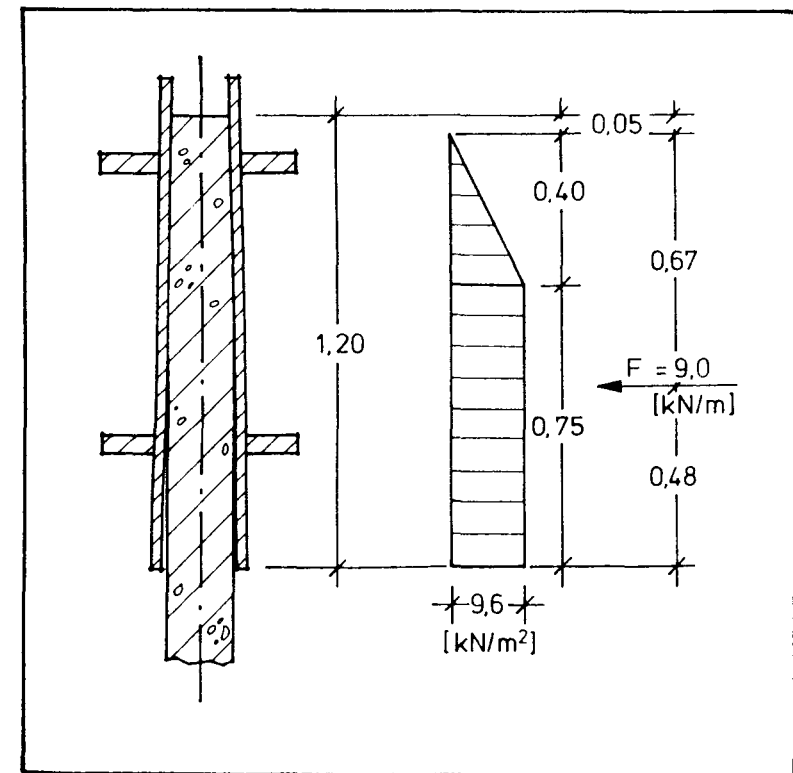


Bild 7: Für die Bemessung der Gleitschalung
empfohlener Lastansatz
(Steinecke, Prokopowicz, Bach /25/)

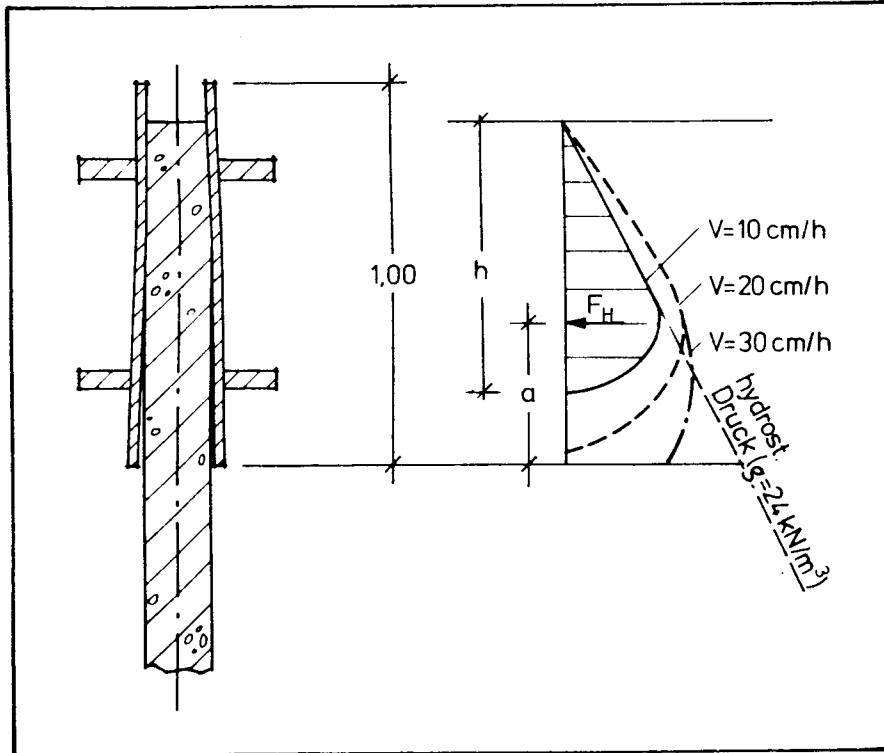


Bild 8: Schalungsdruck des Betons
nach Messungen von
Reichverger und Jaegermann /15, 17/

Gleitgeschwindigkeit $v \text{ [m/h]}$	h [m]	a [m]	F_H [kN/m]
0,10	0,81	0,45	6,00
0,20	0,95	0,38	9,80
0,30	> 1,00	0,32	11,20

Tabelle 2: Schalungsdruck nach Messungen
von Reichverger und Jaegermann
(siehe Bild 8)

Die Größtwerte des Schalungsdrucks wurden bei der 0,40 m dicken Wand und 0,40 m/h Gleitgeschwindigkeit mit 748 kg/m (7,48 kN/m) gemessen. Aus den gemessenen Auflagerkräften der Kranzhölzer schließen die Verfasser auf die wahrscheinliche Schalungsdruckverteilung und schlagen als Bemessungswert eine Druckresultierende von 900 kp/m (9,0 kN/m) in einem Abstand von 0,67 m von Oberkante Schalung vor (Bilder 6 und 7).

Reichverger und Jaegermann berichten in /15, 17/ über Versuchsergebnisse, gewonnen an 1,00 m breiten Versuchswänden, 0,14 m dick und 2,50 m hoch. Als Schalhaut wurden Stahlblech und Polyäthylen benutzt. Der Beton wies ein Slump-Maß von 8 ± 1 cm auf. Zur Verwendung kamen normaler Portlandzement und als Zuschläge Sand sowie gebrochener Granit mit einem Größtkorn von 20 mm. Die Versuche wurden in einer Halle durchgeführt; die Betontemperatur betrug 20 ± 2 ° C. Es wurde sowohl Handverdichtung als auch Verdichtung durch Innenrüttler angewandt. Die Gleitgeschwindigkeiten betrugen 0,10; 0,20 und 0,30 m/h. Die Autoren fanden, daß bei Rüttelverdichtung der Schalungsdruck im oberen Bereich der Schalung größer als der hydrostatische Druck ist und daß in Höhe der Unterkante Schalhaut bei einer Gleitgeschwindigkeit von 0,3 m/h der Schalungsdruck größer als Null ist (Bild 8). Als Maximalwerte für den resultierenden Schalungsdruck wurden bei Rüttelverdichtung gemessen (Tabelle 1):

Gleitgeschwindigkeit [m/h]	Resultierender Schalungsdruck [kN/m]	Lage der Resultierenden von OK Schalung [m]
0,10	6,0	0,55
0,20	9,8	0,62
0,30	11,2	0,68

Tabelle 1 : Gemessener Schalungsdruck nach /17/

Die Verfasser weisen darauf hin, daß bei einer höheren Schalung der Schalungsdruck bei 0,30 m/h Gleitgeschwindigkeit noch größer ausgefallen wäre.

In /11/ berichtet Hermann über einen Versuch an einer Wand mit T-förmigem Grundriß sowie über Messungen auf zwei Baustellen. Die Schalhaut bestand in allen Fällen aus gehobelten Nadelholzbockeln. Der Versuch in einer Halle wurde an einem 2,70 m hohen, 20 cm dicken, leicht bewehrten Wandstück durchgeführt. Der Beton mit Zement PZ 35 und Zuschlagkörnung im Bereich der Sieblinien A/B 32 wies ein Ausbreitmaß zwischen 36 und 44 cm auf; der Mittelwert lag bei 40 cm. Die Frischbetontemperatur betrug 10 ° C, die Lufttemperatur schwankte um 15 ° C. Der Beton wurde durch Innenrüttler verdichtet. Die mittlere Gleitgeschwindigkeit betrug 0,185 m/h. Der maximale Wert des Schalungsdrucks betrug 3,97 kN/m bei voll gefüllter, noch nicht angehobener Schalung; während des Gleitens war der Schalungsdruck geringer. Baustellenmessungen

(auf die Darstellung von Einzelheiten wird hier verzichtet; sie können der Arbeit /11/ entnommen werden) ergaben maximale Werte des Schalungsdrucks von 4,19 kN/m bzw. 4,08 kN/m. Hermann empfiehlt, unter Berücksichtigung eines Zuschlags für Zwängungen die Schalung mit üblichen Sicherheiten für einen horizontal wirkenden Betondruck von 8,0 kN/m zu bemessen. Für die Lage der Resultierenden (und damit die Aufteilung des Schalungsdrucks auf oberes und unteres Kranzholz) werden keine Angaben gemacht.

In /18/ berichtet Rödiger über Messungen an Gleitschalungsbauten und ermittelt in einer Kombination von meßtechnischen und rechentechnischen Verfahren den "Ablösepunkt", an dem sich der Beton von der Schalhaut der Gleitschalung löst. Die - stark streuenden - Werte der Ablösehöhen (von Oberkante Schalhaut gemessen) lagen zwischen 0,509 m und 0,890 m - im Durchschnitt bei 0,723 m. Daraus und aus der mittleren Frischbetonhöhe ermittelt der Autor die Höhe des resultierenden Frischbetonseitendrucks zu 0,498 m von Oberkante Schalhaut.

2.2 Schalungsreibung bei Gleitbauten

2.2.1 Literaturangaben zur Schalungsreibung

Die üblicherweise als Schalungsreibung bezeichneten, beim Heben der Gleitschalung auftretenden Widerstände können verschiedene Ursachen haben, die getrennt betrachtet werden müssen. Dies sind:

- Die Gleitreibung, resultierend aus dem Seitendruck des in der Schalung befindlichen Betons. Der Gleitreibungsbeiwert μ wird sicher von der Betonzusammensetzung (besonders von Korngröße und Kornform) sowie der Rauigkeit der Schalhaut abhängig sein.
- Die Haftreibung (Adhäsion) zwischen Schalung und Beton, abhängig sicher von Betonzusammensetzung sowie Material der Schalhaut.
- Ein Widerstand, der infolge eines Scherbruchs innerhalb des Betongefüges eintritt. Dies kann bei geschädigter Schalungsoberfläche (Einbeulungen bei Metallschalungen) in Teilbereichen, bei sehr rauher Schalung sicher auch großflächig auftreten.

In der älteren Literatur /1,9/ finden sich Angaben über die Schalungsreibung, die nach Erfahrungswerten der Tragkraft der Heber bzw. aus dem Betongewicht der dünnsten, noch schadenfrei ausgeführten Wände abgeleitet wurden. Diesen Ansätzen liegt die Vorstellung zugrunde, daß die Reibkraft nicht größer als das Gewicht des noch innerhalb der Schalung befindlichen Betons sein darf, da sonst der Beton vom bereits fertiggestellten Wandstück abreißt.

Die nach Literaturangaben mit dem Gleitbauverfahren bisher ausgeführte geringste Wanddicke betrug 9 cm /9/. Bei 1,20 m Schalungshöhe und einem Betongewicht von 24 kN/m^3 ergibt sich daraus eine max. Schalungsreibung von 1,30 kN/m, wenn Zugfestigkeit des Betons und die Widerstandswirkung einer Bewehrung nicht berücksich-

tigt werden. Böhm / 1 / ermittelt die Reibung aus dem Gewicht einer 25 cm hohen Frischbetonschicht, "die erfahrungsgemäß das Hochziehen des Betons verhindert". Dies ergibt für eine 20 cm dicke Wand bei 24 kN/m^3 Betongewicht eine Schalungsreibung von $0,60 \text{ kN/m}$. Wie später noch ausgeführt wird, sind die so ermittelten Werte nach neueren Meßergebnissen aus Versuchen wesentlich zu gering. Dies erstaunt zunächst, da diese niedrigen Werte der Schalungsreibung aus Baustellenerfahrungen abgeleitet sind. Es ist zu vermuten, daß zwischenzeitlich eingeführte Änderungen der Technologie des Gleitbauverfahrens zu größeren Werten der Schalungsreibung geführt haben. Dafür kommen sowohl geänderte Konsistenz des Betons (Ausbreitmaße heute um 40 cm, dagegen früher Stampfbeton), andere Verdichtung (Innenrüttler statt Verdichtung durch Stochern und Stampfen), sicher aber auch die bei den früher angewandten, von Hand betriebenen Hebern häufigere Bewegung der Schalung mit nur geringen Ruhezeiten zwischen den einzelnen Hubvorgängen - dadurch wurde ein Anwachsen der Haftreibung auf hohe Werte begrenzt - infrage.

Messungen der Schalungsreibung von Steinecke, Prokopowicz und Bach /25/ ergaben eine maximale Schalungsreibung von 6 kN/m bei einer Holzschalung und $0,4 \text{ m/h}$ Gleitgeschwindigkeit; bei glatter Schalung (Belasit) und/oder kleinerer Gleitgeschwindigkeit war die Schalungsreibung geringer. Die Autoren empfehlen, als max. auftretende Schalungsreibung je lfm Schalung $7,5 \text{ kN/m}$ bei einer Holzschalung und $4,0 \text{ kN/m}$ bei einer wasserundurchlässigen, oberflächenvergüteten Schalhaut anzusetzen.

Hermann /11/ empfiehlt (auf der Grundlage eines Laborversuchs), für Holzschalung und mittlere Gleitgeschwindigkeit ($v = 4 - 6 \text{ m/d}$) eine Reibungskraft von 9 kN/lfm unter Zugrundelegung erhöhter zulässiger Spannungen bzw. 6 kN/m bei Anwendung von zulässigen Spannungen für Hauptlasten anzusetzen.

Reichverger und Jaegermann geben in /16/ aus Laborversuchen abgeleitete Werte von $2,1 \text{ kN/m}$ bis $> 7,0 \text{ kN/m}$ für die Schalungsreibung (bei Rüttelverdichtung) an, wobei die Größe der Schalungsreibung von der Gleitgeschwindigkeit, der Ruhezeit zwischen zwei Hubvorgängen sowie der Schalungsart abhängt (Tabelle 3).

Eigene Messungen /14/ bei Herstellung gegleitener Wände, wobei allerdings die Schalungsreibung nicht in absoluter Größe bestimmt werden konnte, ergaben starke Abhängigkeiten von Betonzusammensetzung und der Zeit zwischen zwei Hubvorgängen.

Gleitgeschwindigkeit [m/h]	Schalungsreibung [kN/m]					
	Gleichmäßige Bewegung		Ruhezeiten zwischen zwei Bewegungen			
	Stahl	PE	60 Minuten		120 Minuten	
			Stahl	PE	Stahl	PE
0,10	4,750	3,700	6,050	4,800	6,900	5,550
0,20	3,300	2,750	6,600	5,100	> 7,000	6,800
0,30	2,400	2,100	7,000	5,400	> 7,000	> 7,000

Tabelle 3 : Schalungsreibung nach Messungen von Reichverger und Jaegermann /16/

3. Eigene Untersuchungen

3.1 Versuche zur Ermittlung der Schalungs- reibung

3.1.1 Versuchseinrichtung

Die Ermittlung von Reibungsbeiwerten bei Relativbewegung zweier sich berührender Körper wird üblicherweise in Reibungsversuchen durchgeführt, bei denen ein senkrecht zur Gleitebene belasteter Körper auf einer geradlinigen Bahn bewegt wird. Der so ermittelte Gleitbeiwert (Reibziffer) ist gemäß dem Coulombschen Reibungsgesetz unabhängig von der Geschwindigkeit der Bewegung und unabhängig von der Größe der Berührungsfläche.

Eine Bewegung tritt erst ein, wenn der Haftverbund gelöst ist; die Haftbeiwerte (Haftziffern) sind größer als die Gleitbeiwerte (Reibziffern).

In Versuchen, bei denen betongefüllte, unten offene Kästen horizontal auf Oberflächen von üblichen Schalungsmaterialien bewegt wurden, ermittelte Specht Reibungsbeiwerte /22/. Die Versuche zeigten, daß die Gleitreibungsbeiwerte im wesentlichen abhängig von der Zusammensetzung des Betons und der Oberflächenrauigkeit der Schalung sind. Den Haftreibungsbeiwert ermittelte Specht zu etwa dem doppelten Wert des Gleitreibungsbeiwerts.

Die von Specht benutzte Versuchseinrichtung weist den Nachteil auf, daß auf dem Gleitweg Feinbestandteile des Betons und Wasser an die Schalungsoberfläche abgegeben, dadurch die Betonzusammensetzung in der Kontaktzone zwischen

Schalung und Beton also verändert wird. Bei Bauausführungen ist die Schalhaut der Gleitschalung ständig in Kontakt mit dem Beton. Es schien daher erforderlich, die Versuchseinrichtung für die eigenen Versuche so auszubilden, daß die Verhältnisse der Bauausführungen möglichst gut nachgebildet werden. Die Versuchseinrichtung wurde daher so ausgebildet, daß betongefüllte, unten offene Prüfkörper aus Kunststoffrohr über einer Schalungsoberfläche gedreht werden konnten. Die Bilder 9 und 10 sowie die Fotos 1 und 2 zeigen die Versuchseinrichtung. Gedreht wurden die Prüfkörper durch ein um die Körper geschlungenes dünnes Drahtseil, gezogen von einem hydraulisch betriebenen Zugkolben; die für die Bewegung erforderliche Kraft wurde durch eine Zugmeßdose gemessen. Die Prüfkörperschalungen hingen mit geringem Abstand frei über der Schalhautoberfläche; die Prüfkörperachsen waren in Kugellagern geführt. Ein nicht mit Beton gefüllter Prüfkörper konnte daher ohne nennenswerte Kraftanwendung bewegt werden.

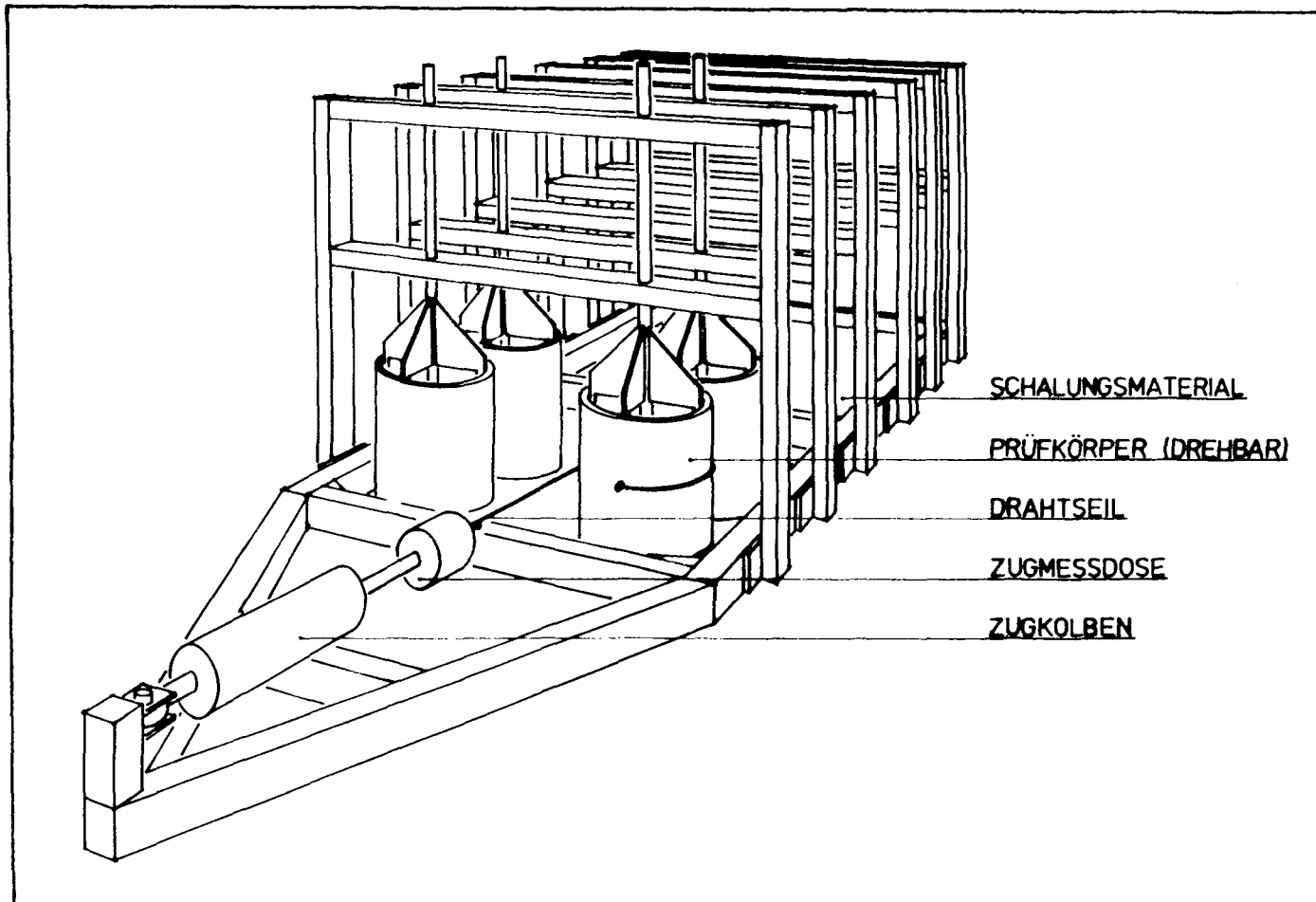


Bild 9: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Reibungskräfte

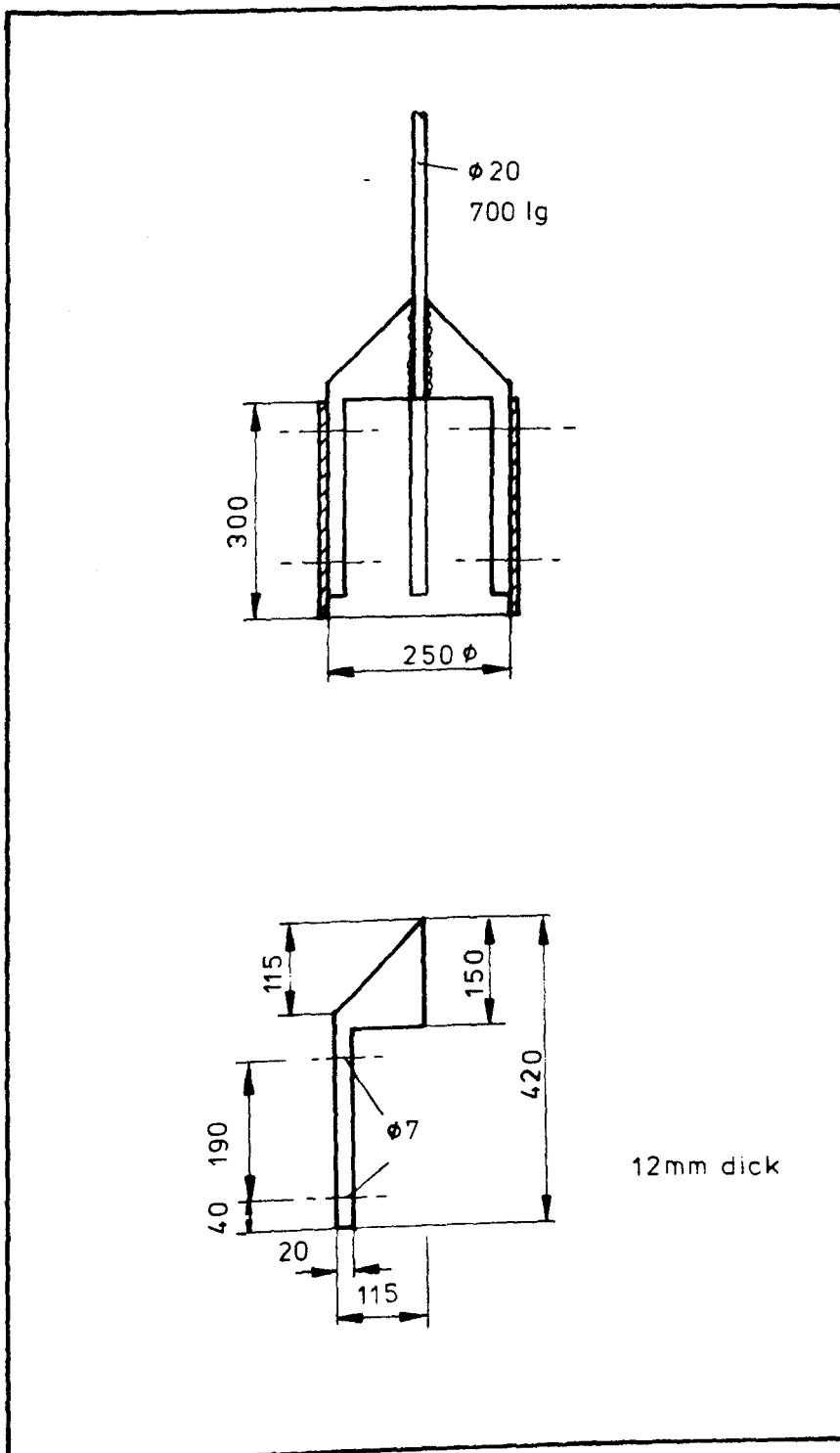


Bild 10: Detail Prüfkörperschalung der Versuchseinrichtung

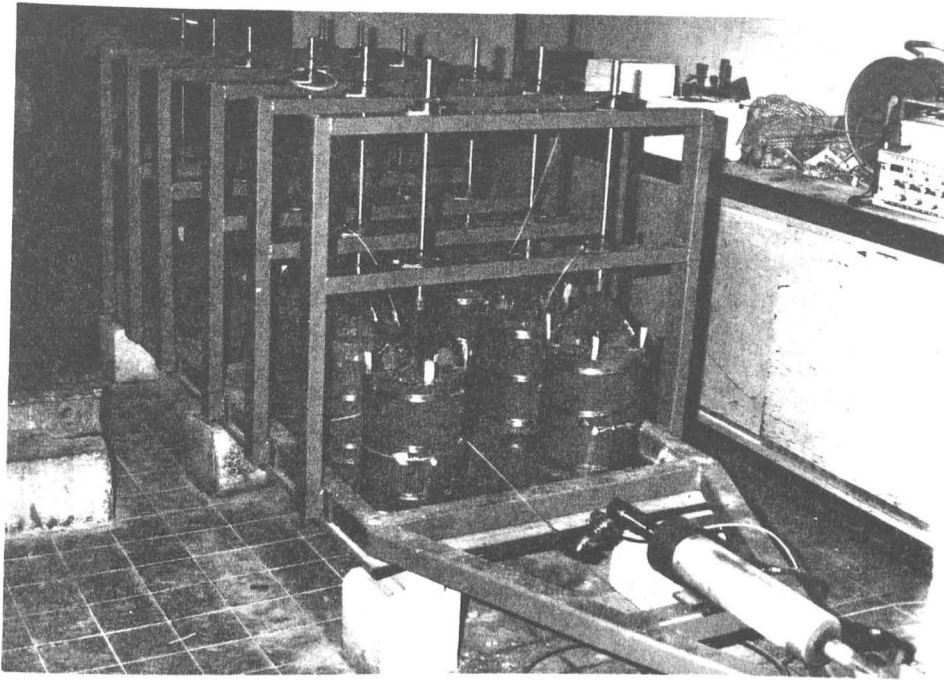


Foto 1: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Reibungskräfte



Foto 2:
Versuchseinrichtung,
Detail Prüfkörper

3.1.2 Versuchsprogramm

Da sowohl die zeitliche Entwicklung der Reibkräfte an Prüfkörpern festgestellt werden sollte, die nach dem Betonieren verschieden lange erhärten konnten (entsprechend den Verhältnissen beim "Anfahren" einer Gleitschalung), als auch die Reibkräfte bei wiederholt in gleichen Zeitabständen erfolgten Bewegungen (entsprechend den Verhältnissen während des Gleitvorganges), wurden zwei unterschiedliche Serien von Versuchen erforderlich.

Serie I umfaßt Versuche, bei denen alle Versuchskörper gleichzeitig mit Beton gefüllt und nacheinander mit zeitlichem Abstand von 30 Minuten bzw. 20 Minuten (bei schnell erhärtenden Zementen) bewegt wurden. Jeder Versuchskörper wurde also nur einmal bewegt, der letzte max. 6 Std. nach dem Betonieren (Versuche Nr. 1 bis 29).

Dagegen wurden die Versuchskörper der Serie II in stets gleichen, von Versuchskörper zu Versuchskörper jedoch unterschiedlich langen Zeitabständen wieder bewegt. Die Prüfkörper blieben jeweils 10, 20, 40, 80 bzw. 160 Minuten in Ruhe (Versuche Nr. 30 bis 45).

Der beschränkte Versuchsumfang gestattete es nicht, alle in der Baupraxis häufig vorkommenden Kombinationen von Schalungsmaterial/Betonzusammensetzung/Zusatzmittel und -stoffen zu untersuchen. Die Versuche erfolgten daher vor allem mit einer kunstharzbeschichteten Mehrschichtenplatte als Schalungsmaterial; in Einzelversuchen wurden auch gehobelte Holzbretter, Stahlblech und rostfreies Stahlblech in die Un-

Versuch Nr.	Zeit zwischen den Einzelversuchen [Minuten]	Schalungs- material	Zuschläge Art	Sieblinie	Zement, Zusätze	Beton- rezept	Wasser- Zement- Wert	Ausbreit- maß [cm]	Verdichtungs- maß
1	30	Mehrschichten- platte	Rundkorn	~ B 32	PZ 35 F	D	0,51	35,0	1,12
2	20	"	"	~ B 32	PZ 45 F	D	0,51	34,5	1,14
3	30	"	"	A/B 32	HOZ 35 L	A	0,45	34,0	1,11
4	30	"	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,42	35,0	1,12
5	20	"	"	A/B 32	PZ 45 F	A	0,42	34,5	1,06
6	20	"	"	C 32	PZ 35 F	C	0,46	39,0	1,06
7	30	"	Splitt	A/B 22	PZ 35 F	E	0,49	31,0	1,11
8	30	"	"	C 22	PZ 35 F	F	0,50	36,0	1,11
9	30	"	Rundkorn	A/B 32	PZ 35 F	A	0,45	35,0	1,11
10	30	"	"	A/B 32	PZ 35 F Füller	B	0,47	36,0	1,08
11	20	"	"	A/B 32	PZ 45 F Füller	B	0,50	36,0	1,06
12	20	"	"	A/B 32	PZ 55 Füller	B	0,50	35,0	1,13
13	30	"	"	A/B 32	HOZ 45 L Füller	B	0,52	34,5	1,04
14	30	Holzbohrer	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,52	36,5	1,05
15	20	"	"	A/B 32	PZ 45 F	A	0,49	34,0	1,12
16	30	"	"	A/B 32	HOZ 45 L	A	0,46	35,0	1,10
17	30	"	"	C 32	PZ 35 F	C	0,43	36,0	1,10
18	30	"	Splitt	A/B 22	PZ 35 F	E	0,42	32,5	1,21
19	30	"	"	C 22	PZ 35 F	F	0,46	38,0	1,05
20	30	"	Rundkorn	A/B 32	PZ 35 F Füller	B	0,44	34,5	1,11
21	20	Holzbohrer	"	A/B 32	PZ 45 F Füller	B	0,44	36,0	1,11
22	30	"	"	A/B 32	HOZ 45 L Füller	B	0,42	34,0	1,17
23	30	"	"	C 32	PZ 35 F Füller	C	0,45	38,0	1,07
24	20	"	"	A/B 32	PZ 45 F Füller	B	0,50	34,0	1,07
25	20	"	"	A/B 32	PZ 55 Füller	B	0,48	30,0	1,20
26	30	rostfreies Stahlblech (V 2 A)	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,48	35,0	1,09
27	30	Stahlblech	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,49	35,0	1,09
28	30	Riffelblech	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,48	35,0	1,07
29	30	"	Splitt	A/B 22	PZ 35 F	E	0,50	35,5	1,11
30	10/20/40/ 80/160	Mehrschichten- platte	Rundkorn	A/B 32	PZ 35 F	A	0,45	36,5	1,09
31	"	"	"	A/B 32	HOZ 45 L	A	0,42	35,5	1,09
32	"	"	"	A/B 32	PZ 45 F	A	0,45	36,5	1,14
33	"	"	"	A/B 32	PZ 35 F Füller	B	0,45	32,0	1,14
34	"	"	"	A/B 32	PZ 35 F Verflüssiger	A	0,39	36,5	1,16
35	"	"	"	A/B 32	PZ 35 F Verzögerer	A	0,42	36,0	1,14
36	"	"	"	A/B 32	PZ 35 F Beschleuniger	A	0,41	37,0	1,06
37	"	"	"	C 32	PZ 35 F	C	0,43	38,0	1,11
38	"	"	"	C 32	PZ 45 F	C	0,46	39,0	1,06
39	"	"	"	C 32	PZ 35 F	C	0,47	35,5	1,12
40	"	"	"	C 32	PZ 55	C	0,45	35,0	1,11
41	"	Holzbohrer	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,47	35,0	1,13
42	"	rostfreies Stahlblech (V 2 A)	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,42	36,5	1,11
43	"	Stahlblech	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,42	34,0	1,13
44	"	"	"	C 32	PZ 35 F	C	0,43	36,5	1,09
45	"	PTFE	"	A/B 32	PZ 35 F	A	0,42	36,0	1,15

Tabelle 4: Versuchsprogramm Reibungsversuche.

Übersicht über die verwendeten Schalungsmaterialien
und Betonzusammensetzungen.

tersuchungen einbezogen. Dies sind alles in der Praxis gebräuchliche Schalungsmaterialien. Zur Feststellung der Meßwerte in extremen Fällen der Schalungsrauigkeit wurden Untersuchungen mit Teflon (PTFE) und mit Riffelblech als Schalungsmaterial durchgeführt.

In Tabelle 4 sind alle durchgeführten Versuche zusammengestellt. Soweit bei der Versuchsdurchführung Besonderheiten auftraten (beispielsweise ungewöhnliche Temperaturentwicklung), wurden diese Versuche wiederholt. Es handelt sich dabei um die Versuche Nr. 12 (Wiederholung von Versuch Nr. 11), Nr. 23 (Wiederholung von Versuch Nr. 17), Nr. 24 (Wiederholung von Versuch Nr. 21), Nr. 25 (Wiederholung von Versuch Nr. 24), Nr. 39 (Wiederholung von Versuch Nr. 37) und Nr. 40 (Wiederholung von Versuch Nr. 38).

3.1.3 Versuchsdurchführung

Die Betonzusammensetzungen können den Tabellen 5 und 6 entnommen werden; die Bilder 11 bis 15 zeigen die Sieblinien der Zuschläge. Bei den Versuchen mit gebrochenem Korn (Splitt) bestanden praxisüblich nur die Korngruppen 8 - 22 mm aus Splitt, die Korngruppen 0 - 8 mm dagegen aus rundkörnigem Sand. Die Fotos 3 und 4 zeigen die Kornformen der Zuschläge.

Die Versuchsdurchführungen einschließlich der Vorversuche zur Erprobung der Versuchseinrichtung erstreckten sich insgesamt über einen Zeitraum von rd. drei Jahren. Da es nicht ratsam schien, Zement derart lange zu lagern, und außerdem das Versuchsprogramm erst im Laufe der Untersuchungen endgültig festgelegt wurde, stammte der bei den Versuchen verwendete Zement aus mehreren verschiedenen Lieferungen. Leider unterschieden sich das Erstarrungsverhalten und die spez. Oberfläche bei den einzelnen Lieferungen; speziell der PZ 35 F erfüllte teilweise sogar die Normbedingungen für einen PZ 45 F. Die gemessenen Erstarrungszeiten und die spez. Oberflächen der verwendeten Zemente können Tabelle 7 entnommen werden; Angaben zu Zusatzmitteln enthält Tabelle 8. Auf den Bildern mit Darstellungen der Versuchsergebnisse sind die für die jeweilige Lieferung festgestellten Erstarrungszeiten angegeben. Die ebenfalls gemessenen - hier nicht wiedergegebenen - Festigkeitswerte der Zemente übertrafen häufig die Anforderungen der DIN 1164 an die Zementarten.

Der Beton wurde in einem 240-l-Zwangsmischer gemischt, von Hand in die Versuchskörper gefüllt und mit einem Innenrüttler verdichtet. Von der Wasserzugabe während des Mischens bis zum Beginn des ersten Versuchs an einem Prüfkörper vergingen weniger als 10 Minuten. Jeweils nach diesem ersten Versuch wurden alle Prüfkörper noch einmal kurz durchgerüttelt; danach erfolgte die Ermittlung der Reibungswerte in den vorgesehenen Zeitabständen gem. Versuchsprogramm, Serie I bzw. Serie II.

Der Kraftanstieg wurde über manuelle Betätigung der Hydraulikpumpe so gesteuert, daß ein weitgehend gleichmäßiger, ruckfreier Anstieg des Öldrucks (und damit der Zugkraft) sichergestellt war. Einen Ausschnitt aus den Aufzeichnungen der Meßwerte zeigt Bild 16. Deutlich ist der Abfall der Zugkraft nach Überwinden des Haftverbundes (hier 0,58 kN) auf den kleineren Wert (hier 0,21 kN) zur Überwindung der Gleitreibung erkennbar.

Die Meßergebnisse wurden sofort während der Versuchsdurchführung mit einem Vielkanalschreiber aufgezeichnet. Zusätzlich zur Aufzeichnung der zum Drehen der Prüfkörper erforderlichen Kraft wurde auch der Temperaturanstieg im Beton infolge Hydratation festgestellt. Die Messung erfolgte mit einem Thermoelement im Beton, eingefüllt in eine Würfelform aus Hartschaum mit 20 cm Kantenlänge. Das Thermoelement war rd. 10 cm unter der Betonoberfläche eingebettet; die Würfelform war dabei nach oben hin nicht abgedeckt.

Die Rauhgigkeiten der bei den Reibungsversuchen verwendeten Schalungsmaterialien (und auch die der Schalhaut von der Baustelle, an der gemessen wurde, vgl. Abschnitt 3.2) wurden mit einer Versuchseinrichtung festgestellt, bei der eine mit einem induktiven Weggeber verbundene Nadel über die Fläche geführt wurde. Die Bilder 17 bis 21 zeigen die Ergebnisse dieser Messungen. Ausgewählt und hier wiedergegeben sind Ausschnitte aus Messungen in Bereichen der Schalungsmaterialien, die eine materialtypische Rauhgigkeit aufwiesen. In Tabelle 9 sind diese Meßergebnisse zusammengestellt. Für die Schalung aus gehobelten Holzbrettern wurde nicht die Rauhgigkeit im Bereich der Brettstöße, sondern diejenige auf der Brettoberfläche als kennzeichnend angesehen.

Körnung	Betonrezept			
	A	B	C	D
0/2 mm	26	26	53	39
2/8 mm [Gew.-%]	28	28	23	23
8/16 mm	16	16	12	13
16/32 mm	30	30	12	25
Zuschläge gesamt [kg/m ³ Beton]	1885	1815	1770	1885
Zement [kg/m ³ Beton]	320	320	370	265
Steinkohlen-Flugasche (EFA-Füller) [kg/m ³ Beton]	-	60	-	-

Tabelle 5: Zusammensetzung der bei den Versuchen verwendeten Betone mit rundkörnigem Zuschlag

Körnung	Betonrezept	
	E	F
0/2 mm	26	52
2/8 mm [Gew.-%]	28	23
8/22 mm	46	25
Zuschläge gesamt [kg/m ³ Beton]	1885	1775
Zement [kg/m ³ Beton]	320	370

Tabelle 6: Zusammensetzung der bei den Versuchen verwendeten Betone mit gebrochenem Zuschlag (Splitt)

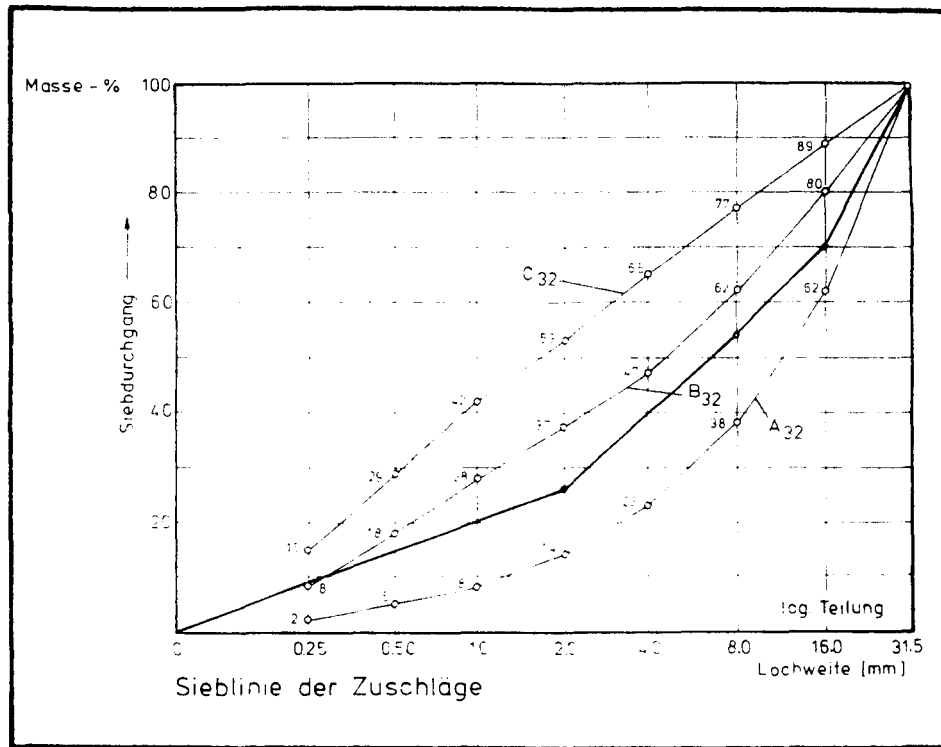


Bild 11: Sieblinie der Zuschläge für die Reibungsversuche
Betonrezepte A und B

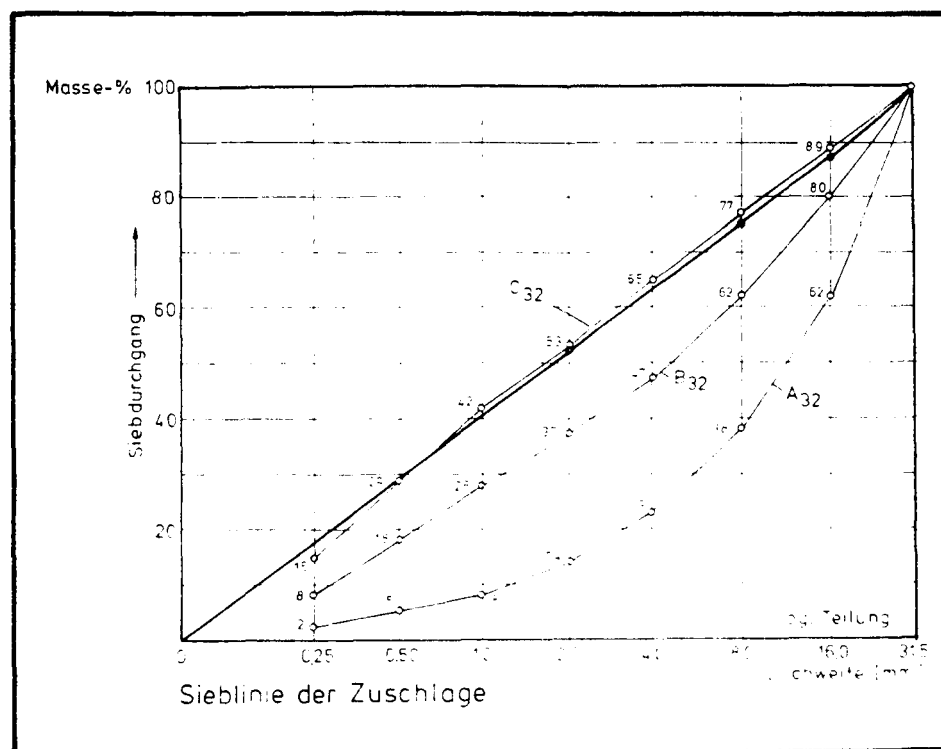


Bild 12: Sieblinie der Zuschläge für die Reibungsversuche
Betonrezept C

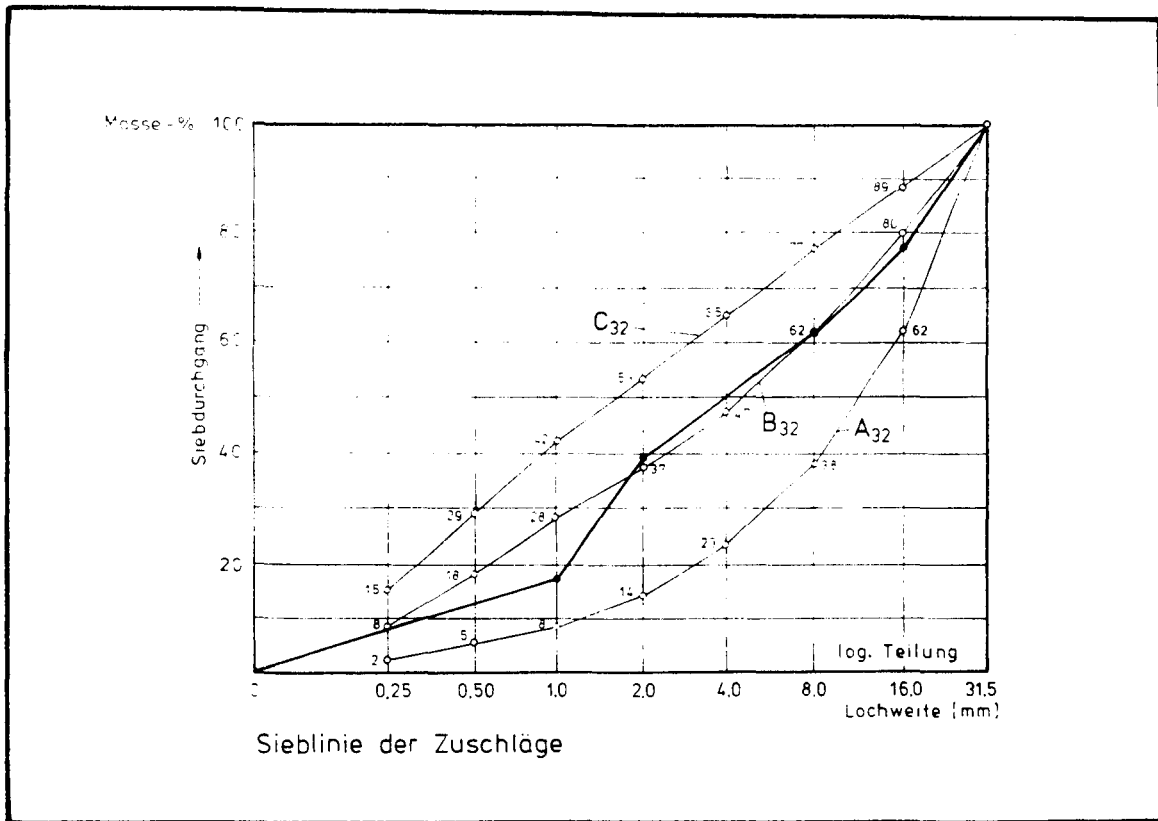


Bild 13: Sieblinie der Zuschläge für die Reibungsversuche
Betonrezept D

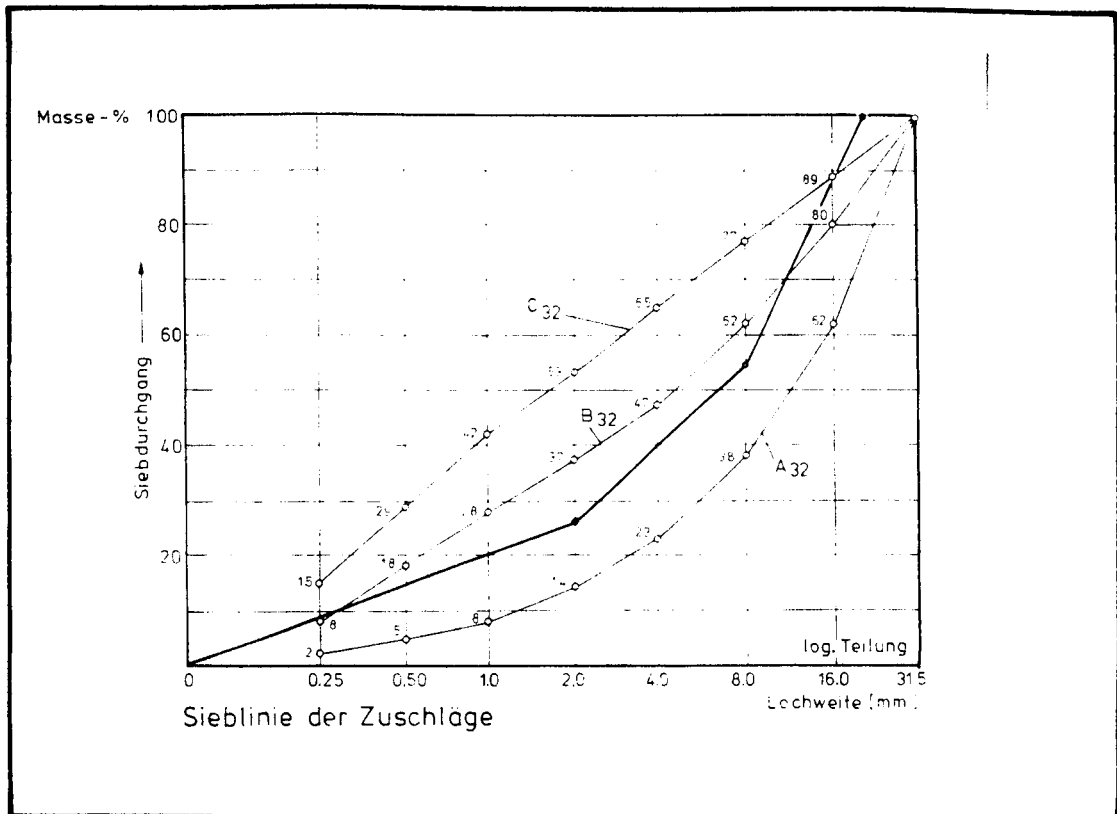


Bild 14: Sieblinie der Zuschläge für die Reibungsversuche
Betonrezept E

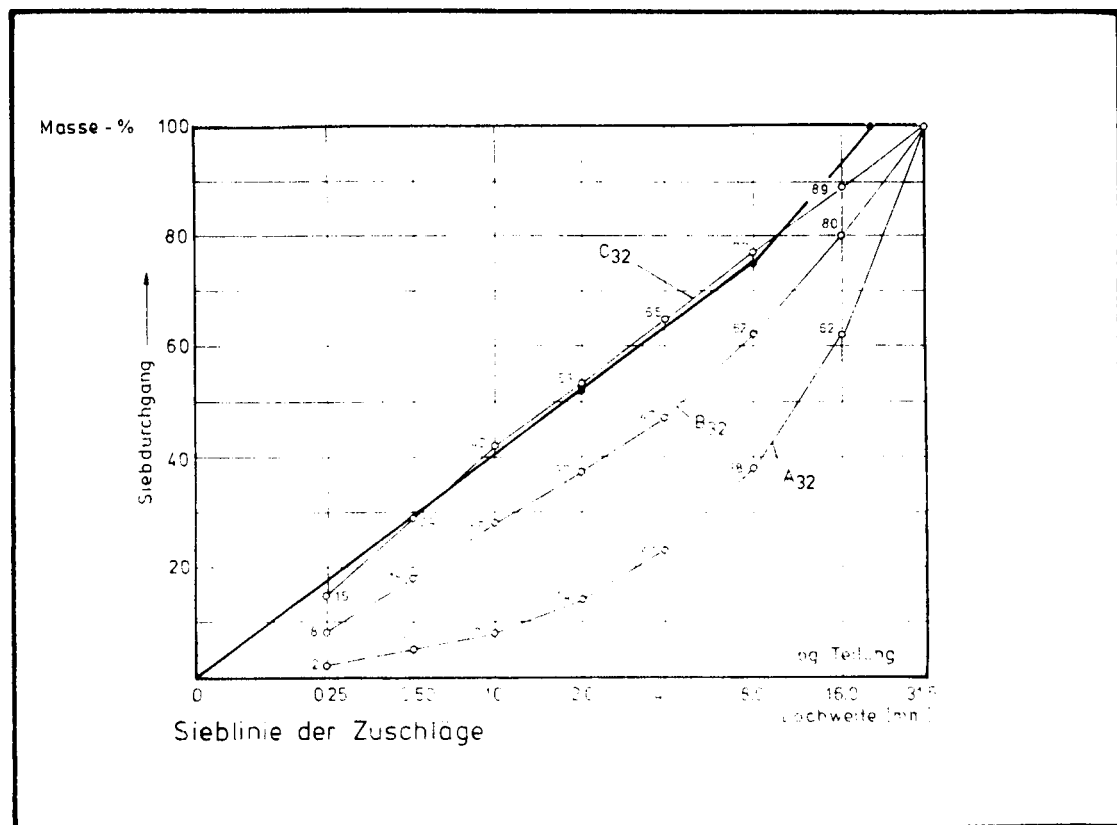


Bild 15: Sieblinie der Zuschläge für die Reibungsversuche
Betonrezept F

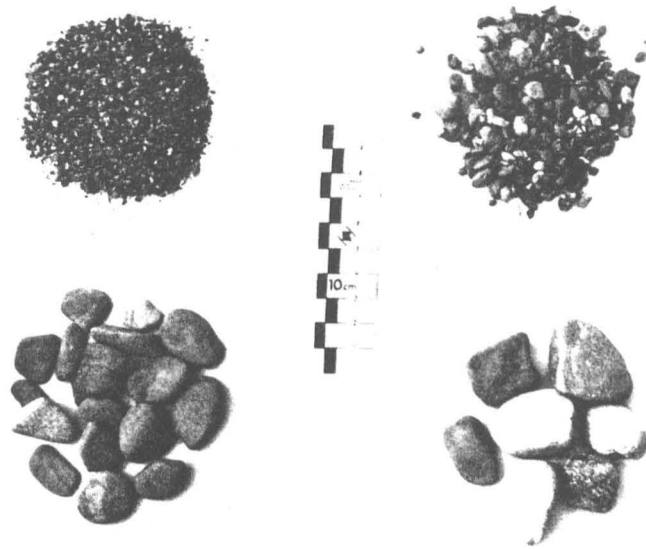


Foto 3: Kornform der Zuschläge der Versuchsbetone
- Rundkorn

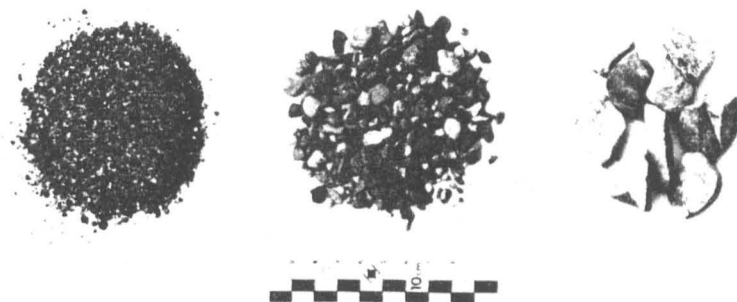


Foto 4: Kornform der Zuschläge der Versuchsbetone
- gebrochenes Korn (Splitt)

Zement	Hersteller	Reindichte [g/cm ³]	Spezifische Oberfläche [cm ² /g]	Erstarrungs- beginn	Erstarrungs- ende	für Versuche Nr.
PZ 35 F	Teutonia	3,11	3120 - 3430	1 h 49 ' bis 2 h 11 '	2 h 40 ' bis 3 h 09 '	1, 4, 6 - 10, 14, 17 - 20, 23, 26 - 30, 33 - 37, 39, 41 - 45
PZ 45 F	Teutonia	3,14	3350 - 3990	1 h 30 ' bis 1 h 58 '	2 h 24 ' bis 2 h 50 '	2, 5, 11, 15, 21, 24, 32
PZ 55	Teutonia	3,06	5350	1 h 32 '	2 h 20 '	12, 25, 40
HOZ 35 L	Nordzement	3,00	3780	3 h 42 '	5 h 02 '	3, 38
HOZ 45 L	Dyckerhoff	3,03	3940 - 4210	2 h 23 ' bis 2 h 35 '	3 h 34 '	13, 16, 22, 31

Tabelle 7 : Eigenschaften der bei den Reibversuchen verwendeten Zemente

Zusatzmittel	Hersteller	Wirkung	Prüfzeichen	Zugabemenge	für Versuch Nr.
Lentan-Verflüssiger	Woermann	Betonverflüssiger mit gleichzeitig verzögernder Wirkung (BV)	PA VII-1/151	0,7 % des Zementgewichts	34
Lentan 66	Woermann	Verzögerer (VZ)	PA VII-4/151	0,5 % des Zementgewichts	35
Schnellerhärter 72	Woermann	Erstarrungs- beschleuniger (BE)	PA VII-5/151	2 % des Zementgewichts	36

Tabelle 8: Bei den Reibversuchen verwendete Zusatzmittel

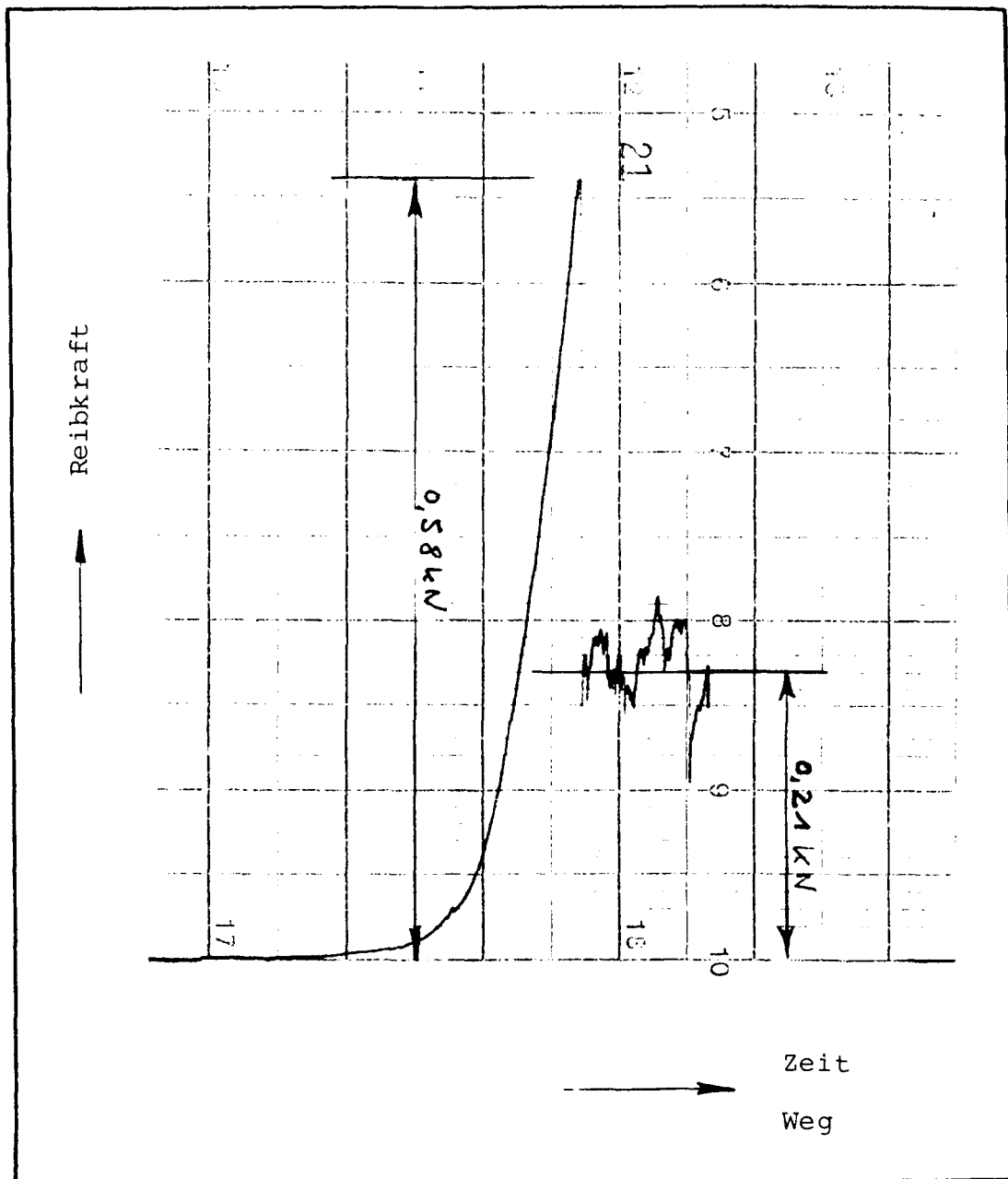


Bild 16: Ausschnitt aus den Aufzeichnungen der
Meßwerte der Reibungsversuche

Schalungsmaterial	Mittelwerte der Rauhtiefe μ [mm]	$\sqrt{\mu}$ [mm ^{1/2}]
Mehrschichten- platte	0,021	0,145
gehobelte Holzbretter	0,18 (Brettstöße 0,745)	0,463
Stahlblech	0,048	0,219
rostfreies Stahlblech (V2A)	0,025	0,158
Riffelblech	1,39	1,18
Schalplatten Baustelle Bremen	0,0485	0,259

Tabelle 9: An den Schalungsmaterialien
gemessene Rauhtiefen

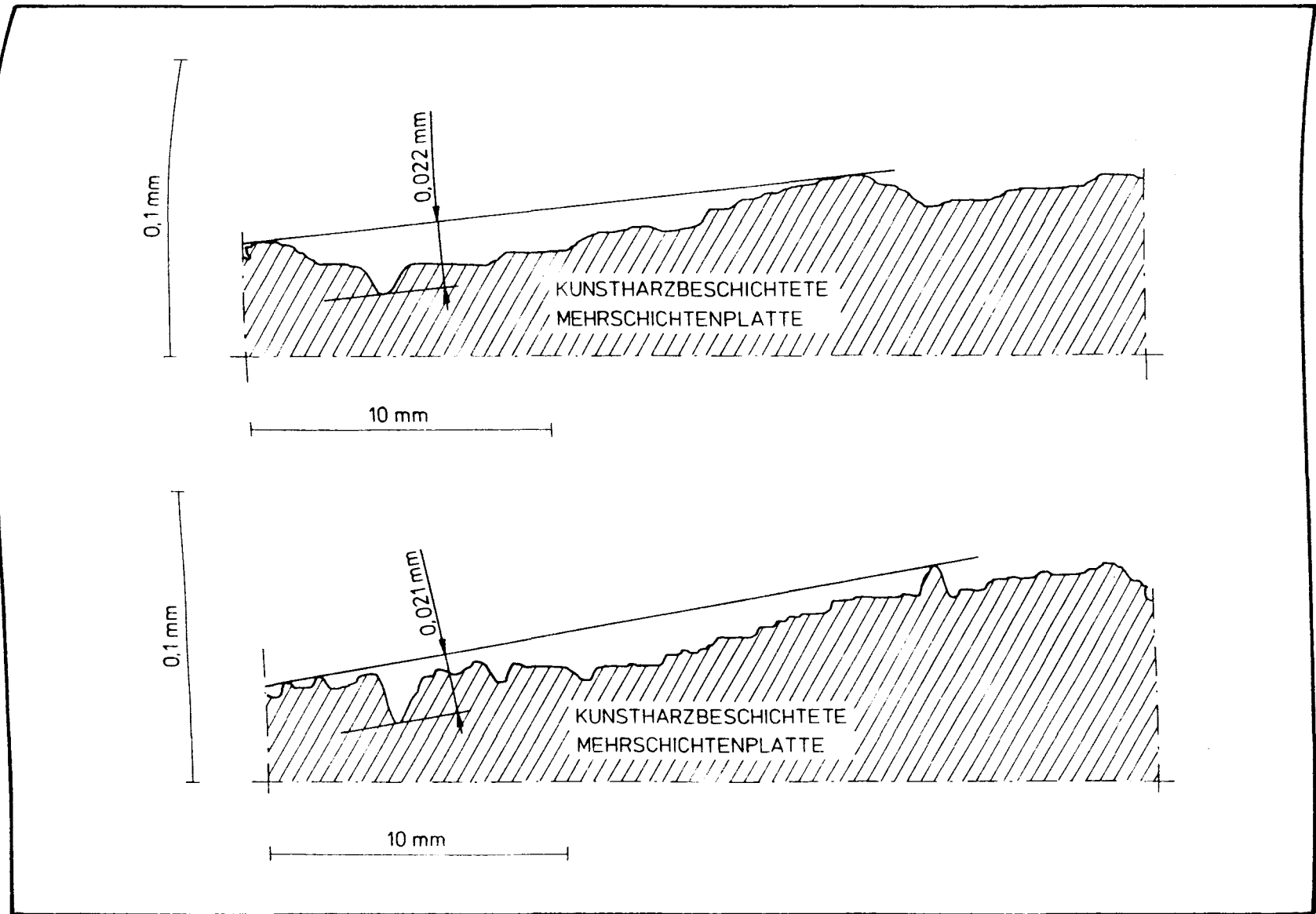


Bild 17: Reibungsversuche

Gemessene Rauigkeiten der Schalung "Kunstharzbeschichtete Mehrschichtenplatte"

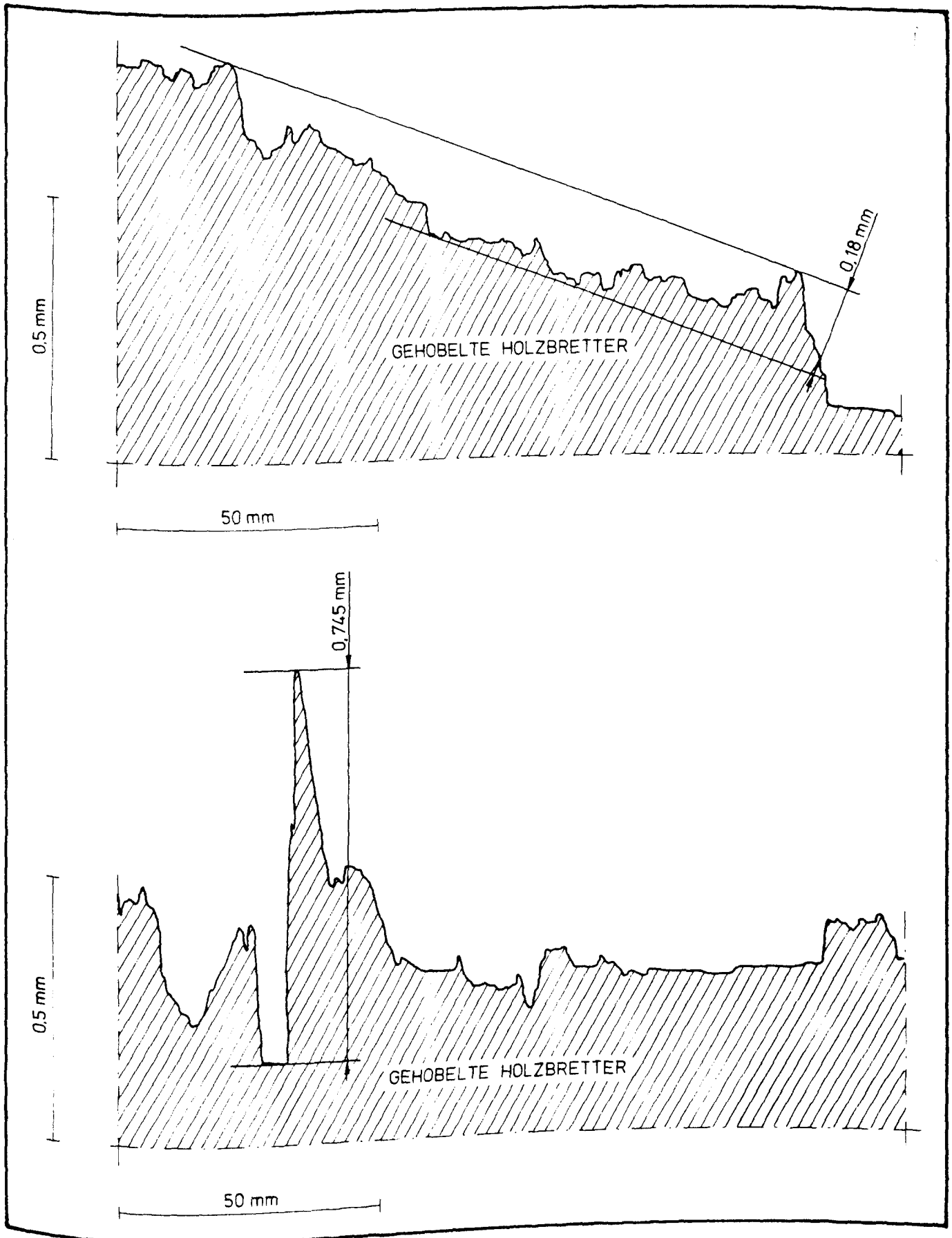


Bild 18: Reibungsversuche
Gemessene Rauigkeiten der Schalung
"Gehobelte Holzbretter"

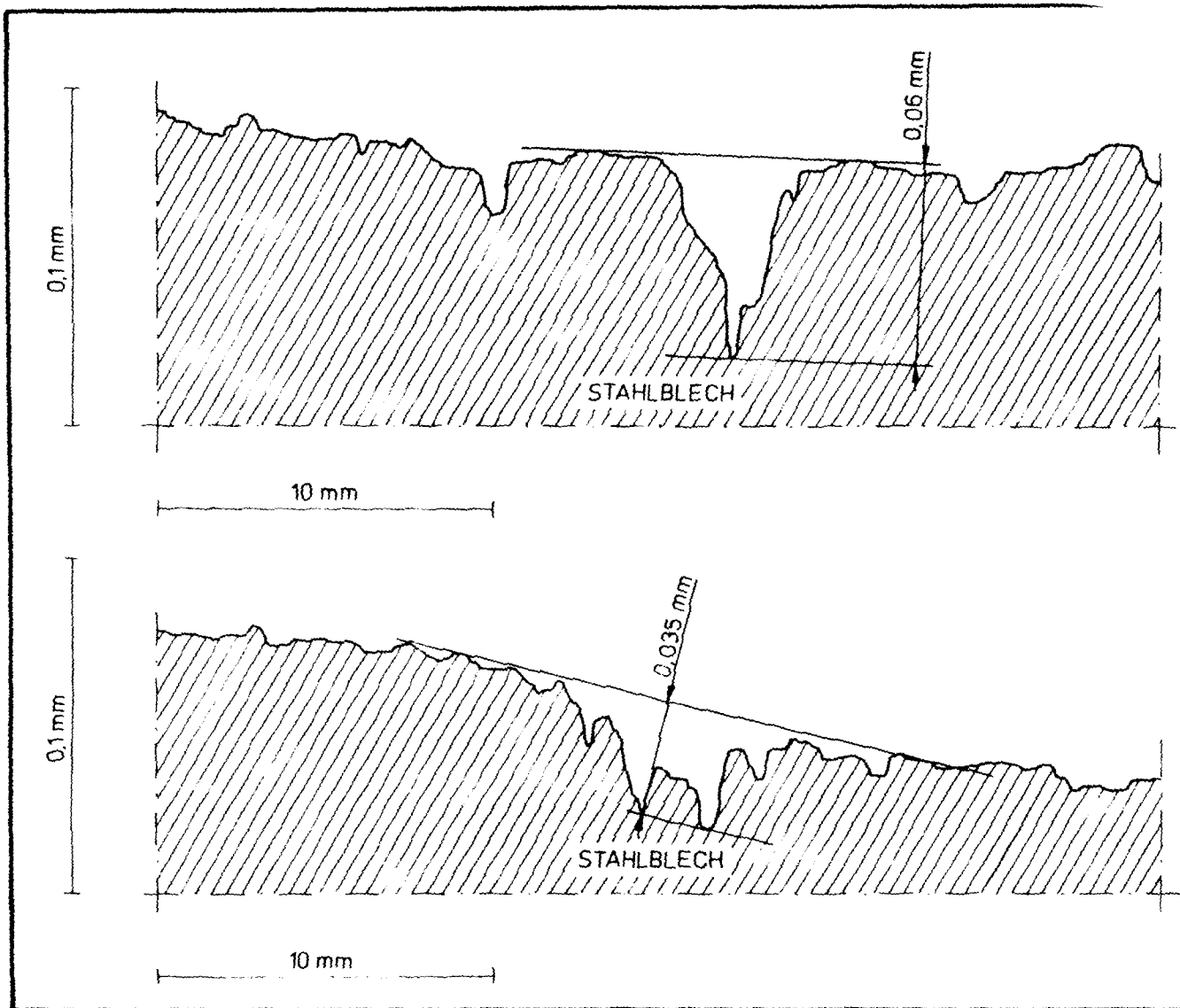


Bild 19: Reibungsversuche

Gemessene Rauigkeiten der Schalung "Stahlblech"

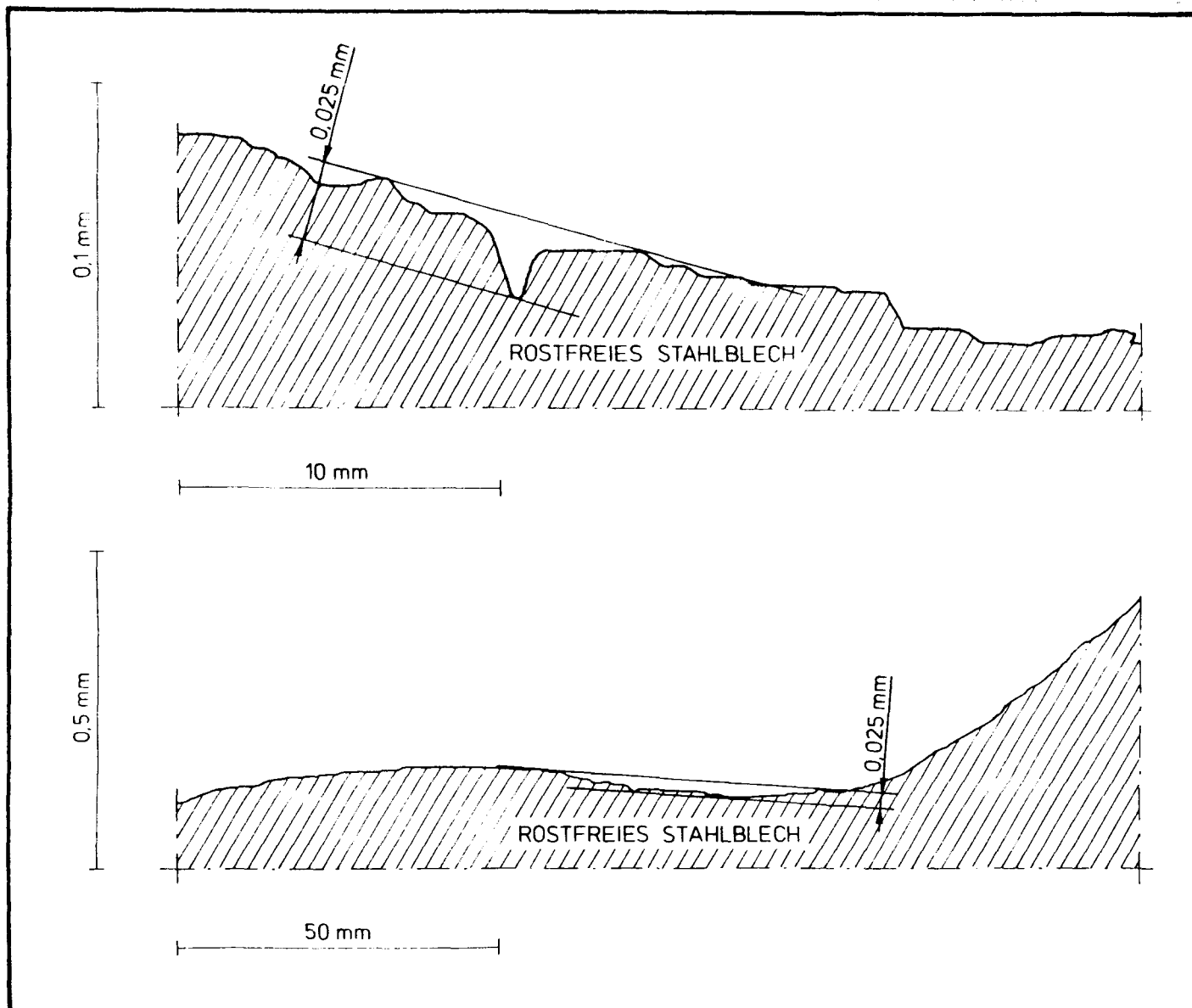


Bild 20: Reibungsversuche

Gemessene Rauigkeiten der Schalung "Rostfreies Stahlblech (V2A)"

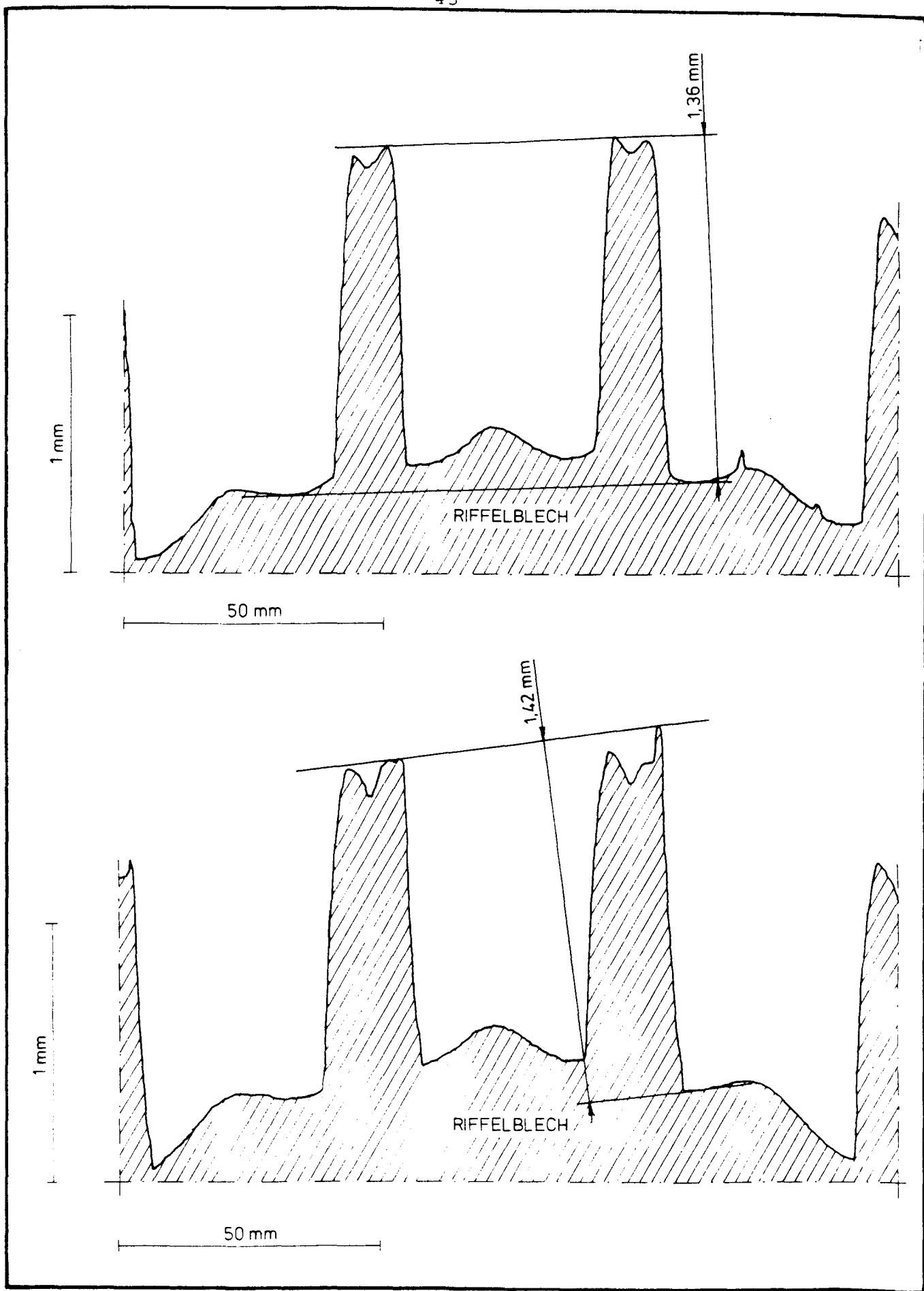


Bild 21: Reibungsversuche

Gemessene Rauigkeiten der Schalung "Riffelblech"

3.1.4 Feststellungen bei der Versuchsdurchführung

Die Versuchseinrichtung hat sich gut bewährt. Bei allen Versuchen wurde der Haftverbund - wie beabsichtigt - durch Drehbewegungen der Versuchskörper überwunden; die Abstützung der Versuchskörper durch die Drehachse war ausreichend steif, um ein denkbare Bewegung der Versuchskörper in Radialrichtung sicher auszuschließen.

Nachteilig war, daß in Einzelfällen bei rauher Schalung (Holzbretter bzw. Riffelblech) und wiederholter Bewegung von Prüfkörpern unter dem Rand der Prüfkörperschalung Zuschlagkörner eingeklemmt wurden und dadurch die Drehbewegungen behinderten. Dies wirkt sich dann bei den relativ kleinen Prüfkörpern ggf. stark auf die Meßergebnisse aus. In der Versuchsauswertung wurden diese Fälle durch Abschätzung der wahrscheinlich korrekten Werte aus den zeitlich benachbarten Meßwerten berücksichtigt.

Bei der Versuchsdurchführung eindeutig erkennbar trat in den meisten Fällen nach Überwinden des Haftverbunds eine Relativbewegung zwischen Oberfläche des Schalungsmaterials und dem Beton der Prüfkörper auf, d. h. ein Gleiten des Betons auf der Schalhaut. Eine Ausnahme machten die Versuche mit sehr rauher Schalung (Riffelblech), in Einzelfällen auch Versuche mit Holzschalung. Hier war zu beobachten, daß bei zunehmendem Alter des Betons häufiger ein "Hochschieben" des Prüfkörpers beim Drehen beobachtet wurde, in jungem Betonalter aber nicht. Dies läßt vermuten, daß bei sehr rauhen Scha-

lungen und wenig erhärtetem Beton nicht der Beton auf der Schalhaut gleitet, sondern ein Scherbruch im Beton selbst eintritt. Erst wenn der Beton fester wird und nicht mehr so leicht abgeschert werden kann, bewegt sich der gesamte Prüfkörper auf der Schalhaut.

3.2 Baustellenmessungen

An einer Silobaustelle konnten während des Gleitvorgangs Schalungsdrücke und Schalungsreibung gemessen werden. Erstellt wurde eine Siloanlage zur Getreidelagerung mit Rechteckzellen. Bild 22 zeigt einen Teilgrundriß des Bauwerks mit Angabe der Lage des für die Messung vorbereiteten Teils der Gleitschalung. Hierfür wurde ein etwa 1,70 m langes Stück der Schalung von der übrigen Gleitschalung abgetrennt, an Zugstangen mit Zugmeßdosen (zur Messung der Schalungsreibung) angehängt und über Druckmeßdosen (zur Messung des Schalungsdrucks) gegen die Heberbockstiele abgestützt (Bild 23).

Die Gleitschalung bestand aus 22 mm dicken gehobelten Holzbrettern, an der dem Beton zugewandten Seite benagelt mit einer 4 mm dicken kunstharzbeschichteten Mehrschichtenplatte als Schalhaut. Die Rauigkeit dieser Schalung wurde (wie auch an den für die Laboruntersuchungen verwendeten Materialien, vgl. Abschn. 3.1.3) meßtechnisch bestimmt; Bild 24 zeigt die Meßergebnisse.

Der Schalungsteil, an dem gemessen wurde, war durch eine Vertikalfuge von der übrigen Schalung getrennt. Auch die Belastung aus der Arbeitsbühne war ausgeschlossen. Allerdings ist es unvermeidbar, daß bei derartigen Baustellenmessungen eine Ankopplung der Meßstrecke an die Nachbarbereiche durch den Beton selbst erfolgt.

Angaben über die Betonzusammensetzung sind in Tabelle 10 zusammengestellt;

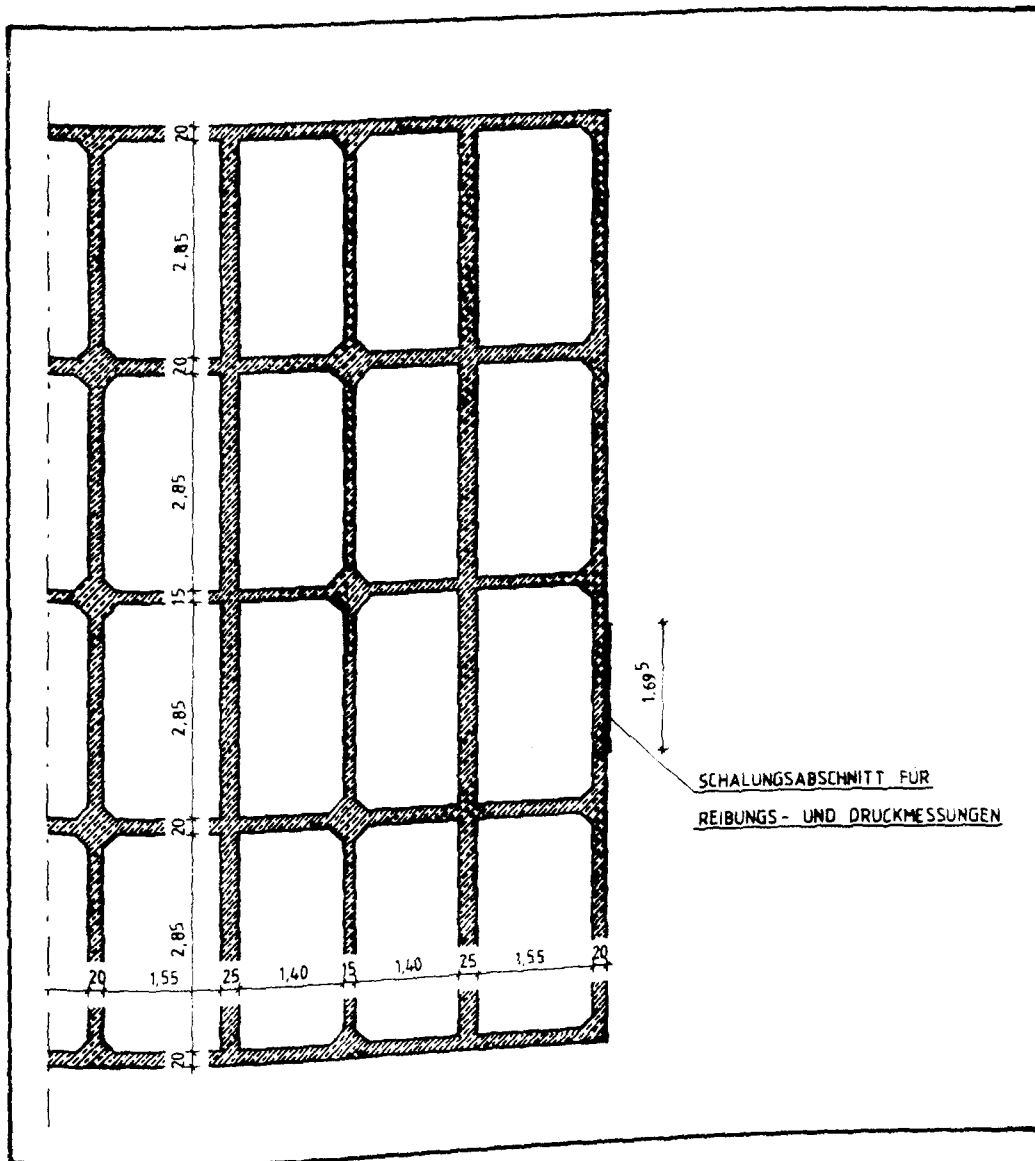


Bild 22: Ausschnitt aus dem Grundriß des Silos,
an dem die Baustellenmessungen
durchgeführt wurden.

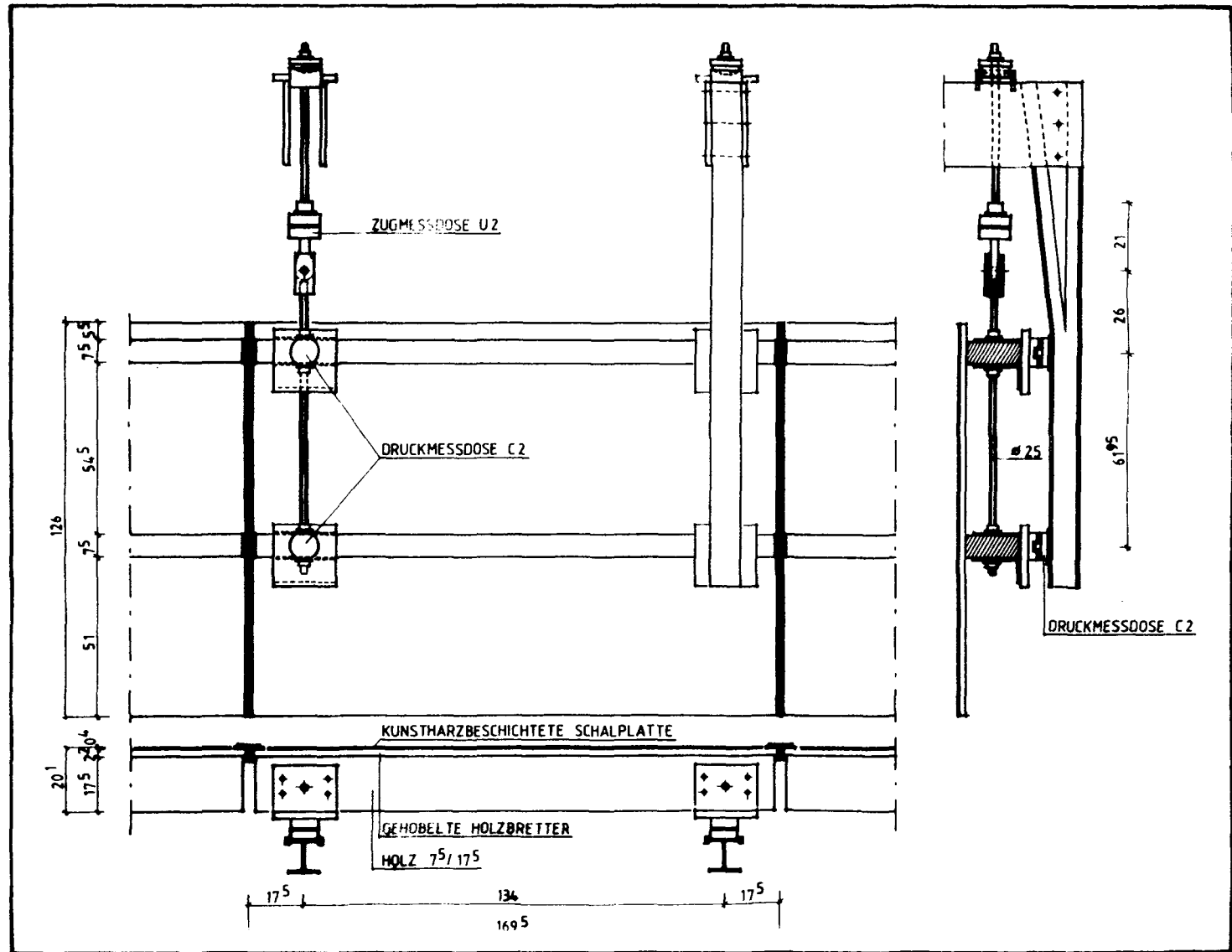


Bild 23: Bei den Baustellenmessungen verwendete Gleitschalung

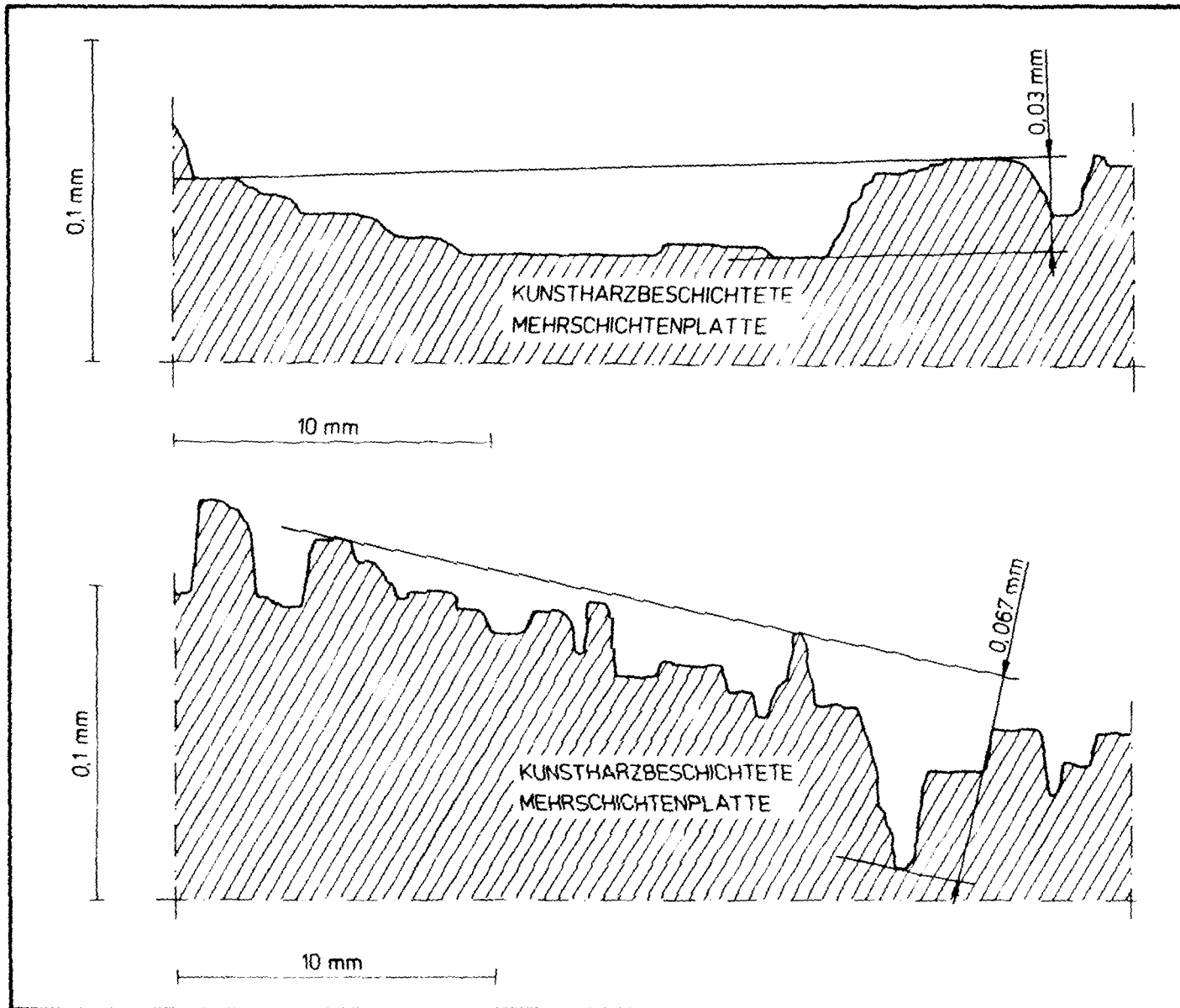


Bild 24: Baustellenmessung

Gemessene Rauigkeiten der an der Baustelle verwendeten Schalhaut

Zement	PZ 35 F 360 kg/m ³ Beton
Zuschlagstoffe	Kiessand A/B 16 0 - 2 mm: 734 kg/m ³ Beton 2 - 8 mm: 367 kg/m ³ Beton 8 - 16 mm: 734 kg/m ³ Beton
Wasser	175 kg/m ³ Beton w/z = 0,49
Zusatzmittel	Betonverflüssiger 0,5 % vom Zementgewicht
Betonkonsistenz	K3, Ausbreitmaß 46 - 48 cm

Tabelle 10:

Zusammensetzung des bei den Baustellenmessungen
verwendeten Betons

Datum	Lufttemperatur	Witterung
03.06.86 04.06.86	+ 5 bis + 10 ° C	schwacher Wind, Regen
07.06.86	um + 12 ° C	schwacher Wind, trocken

Tabelle 11:

Witterungsbedingungen bei den Baustellenmessungen

Tabelle 11 enthält Angaben über die Witterungsbedingungen während der Messungen. Der fertig angelieferte Beton wurde nach Fahrzeiten zwischen 15 und 30 Minuten mit Pumpe und Verteilermast schichtenweise (Schichtdicken 10 bis max. 30 cm) in die Schalung eingebaut und unmittelbar darauf durch Innenrüttler verdichtet. Angestrebt war eine Gleitgeschwindigkeit von etwa 0,15 m/h; die tatsächliche Gleitgeschwindigkeit war - bedingt durch die erforderliche Zeit für den Einbau der Bewehrung und Einbauteile - häufig geringer; die Baustelle versuchte danach, die Zeit wieder einzuholen. Dies führte dann zu deutlich größeren Gleitgeschwindigkeiten, in der Spitze bis zu etwa 0,45 m/h.

Der Gleitvorgang wurde mit einer Automatik gesteuert, durch die in den jeweils eingestellten Zeitabständen Einzelhübe von 22 mm der Schalung ausgelöst wurden. Die Hubvorgänge erfolgten daher unabhängig von der jeweiligen Füllhöhe der Schalung und auch unabhängig von der jeweils im Meßbereich gerade ausgeführten Arbeit (wie Bewehrungsflechten, Betonieren usw.).

Die Signale der Druck- und Zugmeßdosen wurden noch auf der Baustelle mit einem Vielkanalschreiber aufgezeichnet.

Gemessen wurde am 03. und 04.06.86 unmittelbar nach Gleitbeginn und am 07.06.86, als eine Gleithöhe von ca. 13 m erreicht war. Leider mußte bei der Messung am 07.06.86 festgestellt werden, daß zwischenzeitlich eine der Zugmeßdosen ausgefallen war. Sie konnte während des Gleitvorganges auch nicht ausgewechselt werden,

so daß diese zweite Meßserie leider nur eingeschränkte Informationen liefern kann.

Insgesamt wurden in der ersten Meßserie (03.06. und 04.06.86) die Meßwerte von 124 Hubvorgängen, in der zweiten Meßserie (07.06.86) die von 26 Hubvorgängen aufgezeichnet.

Bild 25 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus den Aufzeichnungen der Baustellenmessungen.

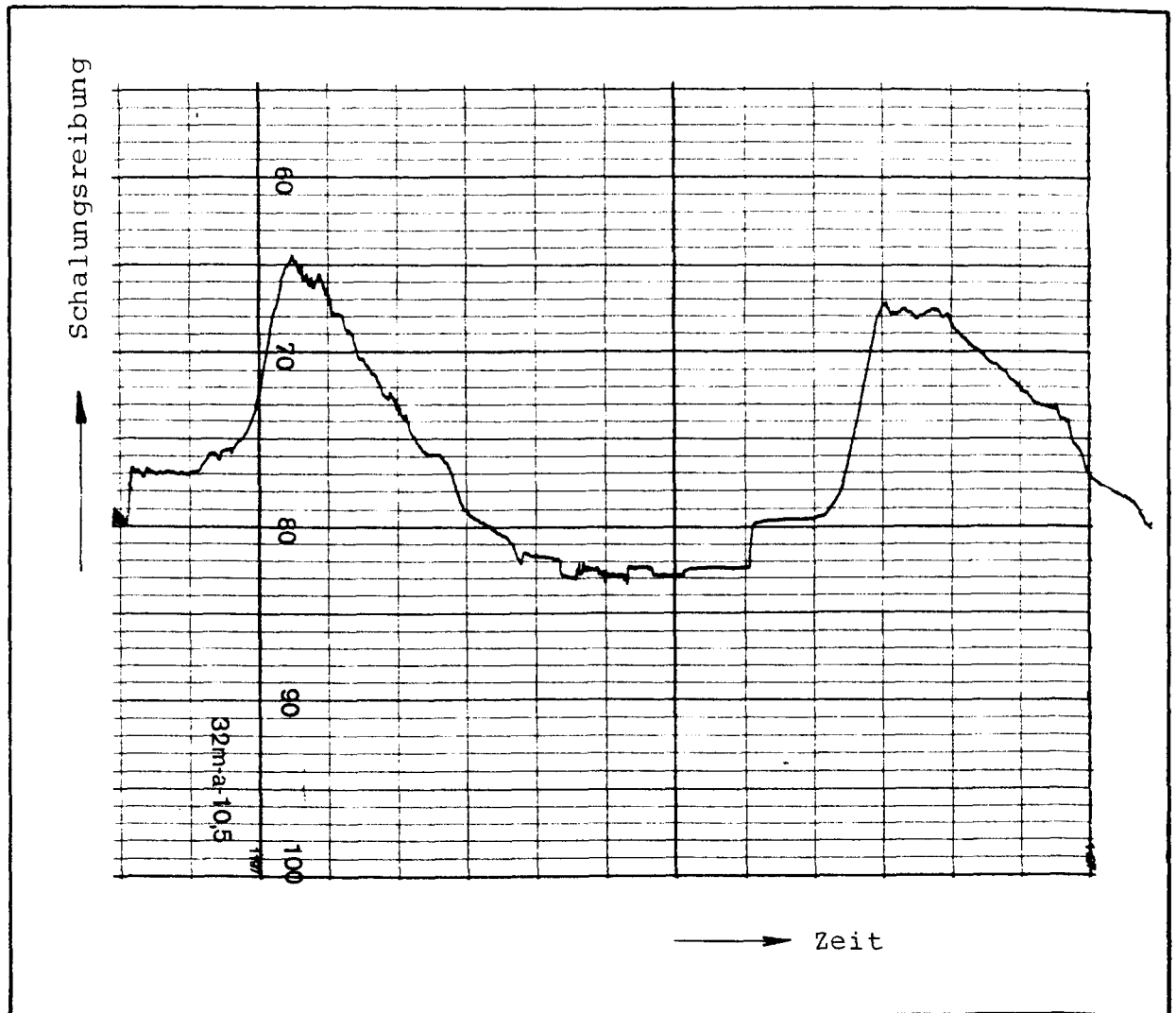


Bild 25: Baustellenmessung

Ausschnitt aus den Aufzeichnungen
der Meßwerte der Schalungsreibung

4. Auswertung der Meßergebnisse

4.1 Auswertung der Reibungsversuche

Die gemessenen Werte der für die Drehbewegung erforderlichen Zugkräfte können den Bildern 26 bis 70 entnommen werden.

Die Bilder 26 bis 54 geben die Werte für die Versuchsserie I (Prüfkörper jeweils nur einmal bewegt) an. Aufgetragen sind sowohl die Werte zur Überwindung der Haftreibung, die nach Überwinden des Haftverbundes auftretenden Werte der Gleitreibung sowie die gemessene Temperatur des Betons. Die außerdem angegebenen Zeiten für Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende der Zemente beziehen sich auf die Prüfbedingungen gem. DIN 1164, also nicht auf die bei Versuchsdurchführung vorhandene Temperatur.

Die Versuchsergebnisse der Versuchsserie II (Prüfkörper in regelmäßigen Zeitabständen mehrfach bewegt) zeigen die Bilder 55 bis 70. Wie bei Serie I sind auch hier gemessene Betontemperatur sowie Erstarrungsbeginn und -ende der Zemente bei Prüfung gem. DIN 1164 angegeben.

Ohne weitere Auswertung erlauben die aufgetragenen Versuchswerte der Serie I bereits folgende Aussagen:

- a) Die Haftreibungswerte steigen mit der Zeit zwischen Einfüllen des Betons und Bewegung des Prüfkörpers an. Der Anstieg der Haftreibungswerte ist in etwa affin zum Erhärtungsverlauf, wobei die Werte nach dem Zeitpunkt des Erstarrungsendes des Zements sehr

viel rascher ansteigen als vorher. Die Maximalwerte der Haftreibung sind mehr als zehnfach so groß wie die Werte der Gleitreibung; nach Erreichen des Maximalwertes werden die Werte wieder geringer, wobei die Neigung des abfallenden Kurvenastes etwas geringer als die des ansteigenden ist.

- b) Die nach Überwinden des Haftverbundes gemessenen Werte der Gleitreibung sind weitgehend unabhängig von der Zeit zwischen Einfüllen des Betons und Bewegen des Prüfkörpers. Soweit die Werte zeitabhängig ansteigen, ist dieser Anstieg wesentlich geringer als der der Werte der Haftreibung.

Diese Zusammenhänge sind qualitativ in Bild 71 dargestellt. Die Zusammenhänge können so gedeutet werden, daß zum Überwinden des Haftverbundes eine Kraft erforderlich ist, die sich aus den zwei Anteilen "Adhäsion" und "Reibung" ergibt. Unter "Adhäsion" soll hier der Anteil verstanden werden, der sowohl echte Adhäsion als auch eine beispielsweise durch Einwachsen von Kristallen in die Schalungsoberfläche während der Erhärtungsphase bedingte Verbundwirkung umfaßt. Dagegen soll hier als "Reibung" der Anteil bezeichnet werden, der nach Überwinden des Haftverbundes festgestellt wurde.

Die auf den Bildern 26 bis 54 jeweils nach Überwinden des Haftverbundes festgestellten Gleitreibungswerte haben für die Praxisanwendung bei Gleitbauten wenig Bedeutung, da die Schalung selbst für die - wesentlich größere - Kraft zur Überwindung der Haftreibung ausgelegt werden muß. Die aufgetragenen Werte der Gleitreibung

zeigen jedoch, daß bei Bemessung der Schalung für die Haftreibungskräfte mit herabgesetztem Sicherheitsbeiwert dieser Lastfall immer bemessungsbestimmend sein wird, der Lastfall Gleitreibung also bei der Bemessung unberücksichtigt bleiben kann.

Die Bilder 73 bis 76 zeigen den Einfluß des Schalungsmaterials, des Bindemittels, der Art der Zuschläge sowie des Ausbreitmaßes auf die Anfangswerte der gemessenen Haftreibung. Schalungsmaterialien mit rauherer Oberfläche haben im allgemeinen größere Anfangswerte der Haftreibung zur Folge (Bild 73). Bei vorsichtiger Interpretation von Bild 74 ist zu vermuten, daß (zumindest bei Schalungen mit glatter Oberfläche) ein Füllerzusatz die Anfangswerte der Haftreibung verringert. Ein signifikanter Einfluß der Zuschläge oder des Ausbreitmaßes auf diese Werte ist nicht erkennbar (Bilder 75 und 76). Für eine rechnerische Ermittlung der Haftreibungswerte sollte - solange keine weiteren Versuchsergebnisse vorliegen - zur Bestimmung des Anfangswertes der Haftreibung nur die Schalungsrauheit berücksichtigt werden; der Einfluß weiterer Parameter ist derzeit wegen der Streuung der gemessenen Werte nicht sicher anzugeben, scheint jedoch auch von zweitrangiger Bedeutung zu sein.

Zur mathematischen Beschreibung des zeitabhängigen Anstiegs der Haftreibungswerte wurde ein Ansatz der Form

$$f_{(t)} = A \cdot t \cdot e^{B \cdot t} + C \quad (\text{Gl. 5})$$

gewählt, der sich nach Vergleichsrechnungen als besonders geeignet erwiesen hat. Der im Prinzip relativ einfach zu beschreibende, stetige Verlauf der im Versuch gefundenen Kurvenverläufe ist mit großer Genauigkeit auch durch andere Funktionen anzunähern. Der gewählte Ansatz hat jedoch den großen Vorteil, daß den Parametern A, B und C sinnvoll Eigenschaften der Schalungsoberfläche bzw. des Betons zugeordnet werden können.

Die aus den Versuchswerten ermittelten Werte A, B und C enthält Tabelle 12. Die Güte der Annäherung an die Versuchswerte ist in Bild 77 beispielhaft für den Versuch Nr. 1 gezeigt. Nicht beschreiben kann der gewählte Ansatz den in einigen Versuchen festgestellten Abfall der Kurve nach einigen Stunden Ruhezeit der Prüfkörper, beispielhaft bei Versuch Nr. 7 (Bild 32). Dies kann jedoch hingenommen werden, da der abfallende Verlauf der Meßwerte der Haftreibung (wahrscheinlich verursacht durch Schrumpfen und Fröhschwinden des Betons und dadurch bewirkte Ablösung von der Schalung) baupraktisch ohne Bedeutung ist und daher hier in der Versuchsauswertung unbedenklich vernachlässigt werden kann.

Bei Ansatz der bekannten Reifeformel nach Saul unter der Voraussetzung, daß bei -12°C die Erhärtungsgeschwindigkeit gleich Null wird / 3 / und die bei Ermittlung der Erstarrungszeiten der Zemente herrschende Temperatur von $+20^{\circ}\text{C}$ als "Normaltemperatur" betrachtet wird, ergeben sich die temperaturabhängigen Korrekturwerte aus

$$r_T = \frac{T}{32} + 0,375 \quad (\text{Gl. } 6)$$

mit T = Betontemperatur bei Anmischen [$^{\circ}\text{C}$].

Eine Umrechnung der Kurvenparameter und Auswertung (hier nicht wiedergegeben) zeigte, daß diese Beziehung hier nicht voll geeignet zur Beschreibung des temperaturabhängigen Erhärtungsverlaufs in jungem Alter des Betons ist.

Besser geeignet scheint eine Beziehung

$$r_T = 0,05 T + 0,25; \quad (\text{Gl. } 7)$$

abgeschätzt aus der Auswertung der Kurvenparameter B , aufgetragen über die Temperatur bei Versuchsbeginn (Bild 78). Leider waren in der Literatur keine verwertbaren Angaben über die Temperaturabhängigkeit der Festigkeitsentwicklung des Betons in jungem Alter zu finden, so daß hier nur diese - sicher recht grobe - Abschätzung der weiteren Auswertung der Meßwerte zugrunde gelegt werden muß. Es kann als sicher angesehen werden, daß sowohl der Kurvenparameter A als auch B temperaturabhängig sind. Beide wurden deshalb - mangels besseren Wissens - mit der gleichen obigen Beziehung temperaturkompensiert.

Tabelle 13 enthält die so temperaturkompensierten Kurvenparameter A und B .

Der Wert C in Gleichung (5) läßt sich als Anfangswert der Haftreibung (zum Zeitpunkt $t = 0$) deuten und ist damit identisch mit den auf den Bildern 73 bis 76 angegebenen Werten. Der Wert wird daher stark von der Schalungsart, wahrscheinlich aber auch von der Betonzusammensetzung abhängen, jedoch vermutlich nicht von der Temperatur des Betons (Tabelle 14). Bild 79 zeigt die über der Rauhtiefe der Schalung (als \sqrt{R} definiert) aufgetragenen Werte des Kurvenparameters C. In guter Annäherung lassen sich die Werte aus

$$C = 0,1 + 0,25 \sqrt{R} \quad (\text{Gl. } 8)$$

mit R = Rauhtiefe [mm]

ermitteln.

Die Auswertung zeigt, daß häufig die Werte von Betonmischungen mit Zuschlägen aus gebrochenem Korn und Mischungen mit für gemahlenem Zement (PZ 55, PZ 45 F, HOZ) oberhalb der eingetragenen Linie liegen. Dies ist auch einleuchtend, da gebrochenes Korn die Reibung und Feinbestandteile die Adhäsion erhöhen. Bis weitere Versuchsergebnisse vorliegen, wird vorgeschlagen, bei gebrochenem Korn und/oder besonders fein gemahlenen Zementen den Wert C aus

$$C = 0,15 + 0,25 \sqrt{R} \quad (\text{Gl. } 9)$$

zu bestimmen.

Die Gleichungen (8) und (9) sind in Bild 80 dargestellt, Definition der Rauhgigkeiten vgl. Abschnitt 7.

Der Kurvenparameter A ist erkennbar vorrangig von der Schalungsrauhigkeit abhängig; daneben scheint auch noch eine Abhängigkeit von der Erhärtungsgeschwindigkeit der Zemente (und damit auch von Zusatzstoffen und -mitteln) zu bestehen (Bilder 81 bis 83). Bei einem Ansatz der Form

$$A = \eta_T (a_1 + a_2) \quad (\text{Gl. 10})$$

lassen sich, abgeleitet aus den Versuchsergebnissen, für a_1 in Abhängigkeit von der Schalungsrauhigkeit Werte zwischen 0 und $\sim 0,06$ angeben. Es wird vorgeschlagen, den auf Bild 84 dargestellten Kurvenverlauf zur Ermittlung von a_1 zu verwenden; hinsichtlich der Definition der Rauigkeiten vgl. Abschnitt 7. Die Werte von a_2 können zu etwa

+ 0,03	bei	HOZ 35 L
+ 0,02	bei	HOZ 45 L
0,0	bei	PZ 35
- 0,01	bei	PZ 45 F und PZ 55

angesetzt werden; bei Verwendung von Füller (Steinkohlen-Flugaschen) sind die Werte von a_2 - wahrscheinlich abhängig von der Zugabemenge - um etwa 0,01 bis 0,015 zu erhöhen. Bild 85 enthält einen Vorschlag zur Ermittlung von a_2 .

Der Kurvenparameter B ist stark abhängig von der Erhärtungsgeschwindigkeit der Zemente, darüber hinaus aber auch noch von der Art des Schalungsmaterials (Bilder 86 bis 88). Vorgeschlagen wird für B ein Ansatz der Form

$$B = \eta_T [(b_1 + b_2) \cdot b_3]; \quad (\text{Gl. 11})$$

wobei b_1 in Abhängigkeit von der Zementart nach Bild 89 bestimmt werden kann. Der Wert für b_2 erfaßt den Einfluß von Zusatzmitteln und -stoffen; für Füllerzugabe kann er mit etwa - 0,05 bis - 0,10 angegeben werden. Mangels ausreichender Versuchsergebnisse können für Zusatzmittel derzeit keine Werte b_2 angegeben werden. Der Faktor b_3 erfaßt den Einfluß des Schalungsmaterials; er kann nach Bild 90 ermittelt werden. Der - abgeschätzte - Kurvenverlauf berücksichtigt, daß bei glatter Schalung der Verbund zwischen Schalung und Beton, bei sehr rauher Schalung Abscheren im Beton selbst maßgebend für die Größe der Werte wird (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Die Versuche mit mehrfach - in jeweils gleichen Zeitabständen - bewegten Versuchskörpern (Versuchsserie II) bestätigen die Ergebnisse der Versuche der Serie I und weisen nach, daß auch hierbei die Ruhezeit zwischen zwei Bewegungen maßgeblich die Größe der Haftreibungskraft beeinflusst. Die jeweils zum Überwinden des Haftverbundes erforderliche Kraft ist in den Bildern 55 bis 70 angegeben. Bei den Versuchen war mehrfach deutlich zu beobachten, daß sich Körner des Betonzuschlags zwischen Prüfkörperschalung und Schalungsplatte verklemmten und dadurch stark die Meßwerte der Reibkraft beeinflussten. Auf diesen Umstand ist die bei einigen Versuchen in ihrer Größe stark schwankende gemessene Reibkraft gleicher Versuchskörper zurückzuführen.

Um die Kurvenverläufe zu "glätten" und die Grundtendenzen der Meßwerte klarer zutage treten zu lassen, sind auf den Bildern 91 bis 106 die Summenkurven der Meßwerte (als Summen der Produkte aus Reibkraft x Zeitabstand zwischen zwei Bewegungen) aufgetragen. Hier ist deutlich zu erkennen, daß jede Verlängerung der Ruhezeiten zwischen zwei Bewegungen die Haftreibung vergrößert. Auf Bauausführungen übertragen bedeutet dies, daß die einzelnen Hubvorgänge der Gleitschalung in möglichst kurzen Zeitabständen aufeinander folgen sollten, um die Werte der Haftreibungskräfte gering zu halten.

Die Versuchsergebnisse erlauben außerdem noch die folgenden Aussagen:

- Die Verwendung von Zusatzmitteln bei den Versuchen Nr. 34 (Verflüssiger) und Nr. 35 (Verzögerer) erbrachte gegenüber dem Vergleichsversuch ohne Zusätze geringere Werte der Haftreibung. Beim Versuch Nr. 36 (Beschleuniger) wurden die Haftreibungswerte in etwa der gleichen Größenordnung wie bei Versuch Nr. 30 (ohne Zusätze) gefunden. Erwartet wurden höhere Werte. Möglicherweise war der Beschleuniger in den ersten Stunden der Betonerhärtung noch nicht voll wirksam.
- Die Versuche Nr. 37 bis 40 (mit sandreichem Zuschlag, Sieblinie C 32) ergaben niedrigere Werte der Haftreibungskräfte als die Vergleichsversuche mit Sieblinie A/B 32.
- Die Schalung aus Holzbrettern (Versuch Nr. 41) erbrachte trotz größerer Schalungsrauigkeit etwa gleiche Werte der Haftreibungskräfte wie

der Vergleichsversuch mit einer Mehrschichtenplatte als Schalungsmaterial.

- Die in den Versuchen Nr. 42 bis 45 verwendeten glatten Schalungsmaterialien (V2A, Stahlblech, PTFE) führten zu geringeren Haftreibungskräften als Vergleichsversuche mit einer Mehrschichtenplatte. Die gemessenen Werte bei PTFE erreichten dieselbe Größenordnung wie bei Stahlblech als Schalung. PTFE als Schalhaut scheint daher gegenüber wesentlich preiswerteren Materialien wie Stahl und V2A im Gleitbau keine Vorteile zu bieten.

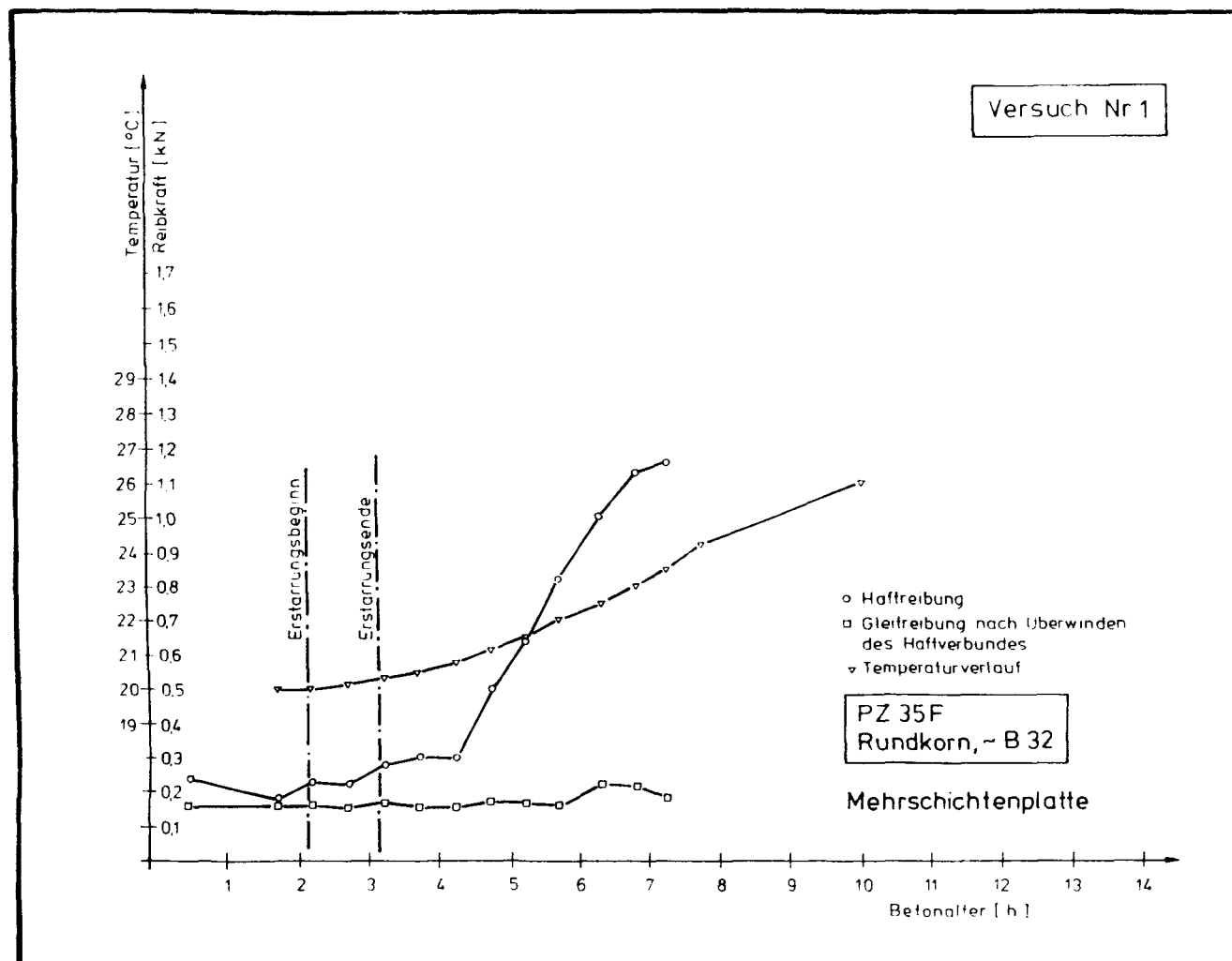


Bild 26: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 1

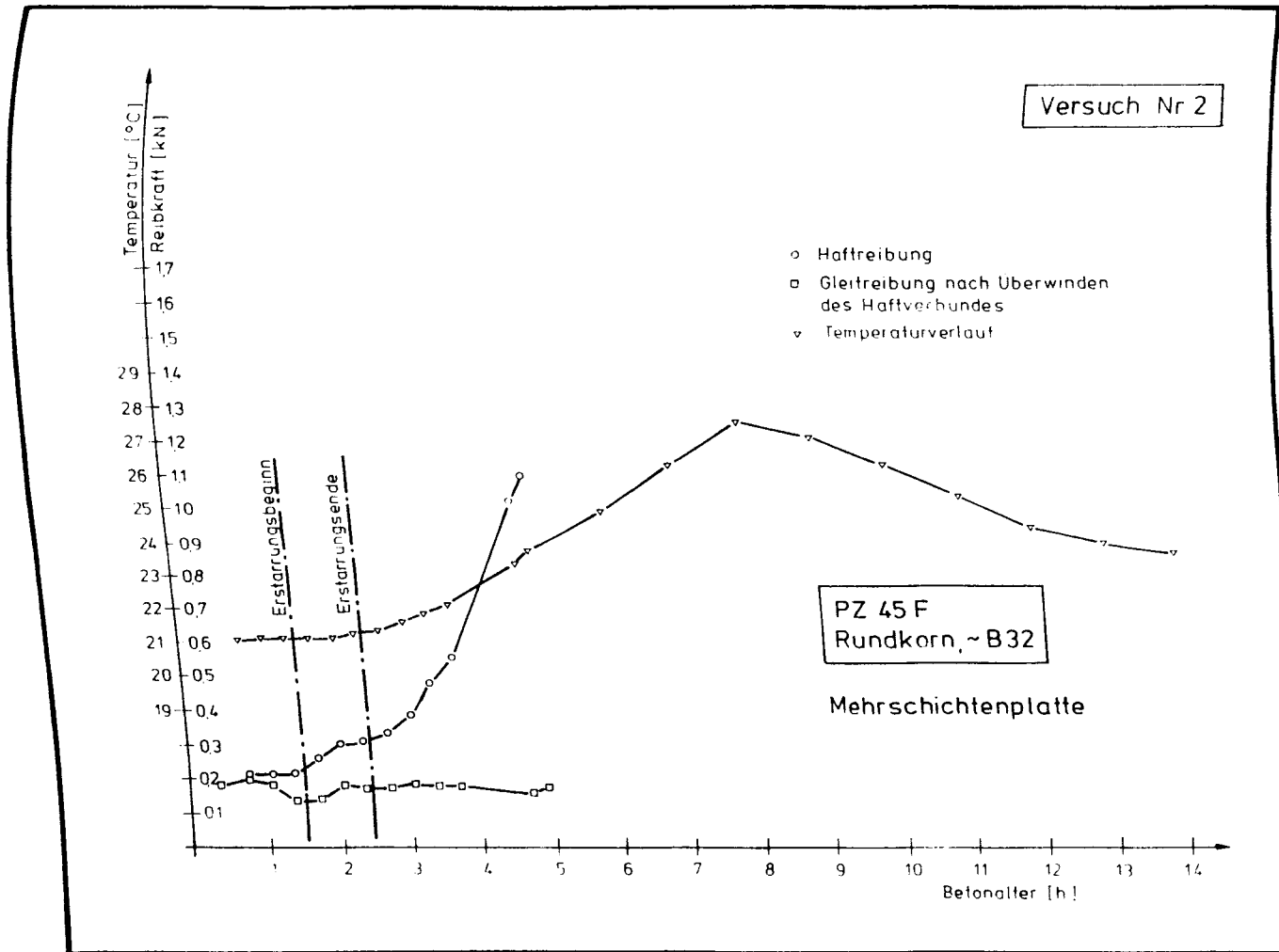


Bild 27: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 2

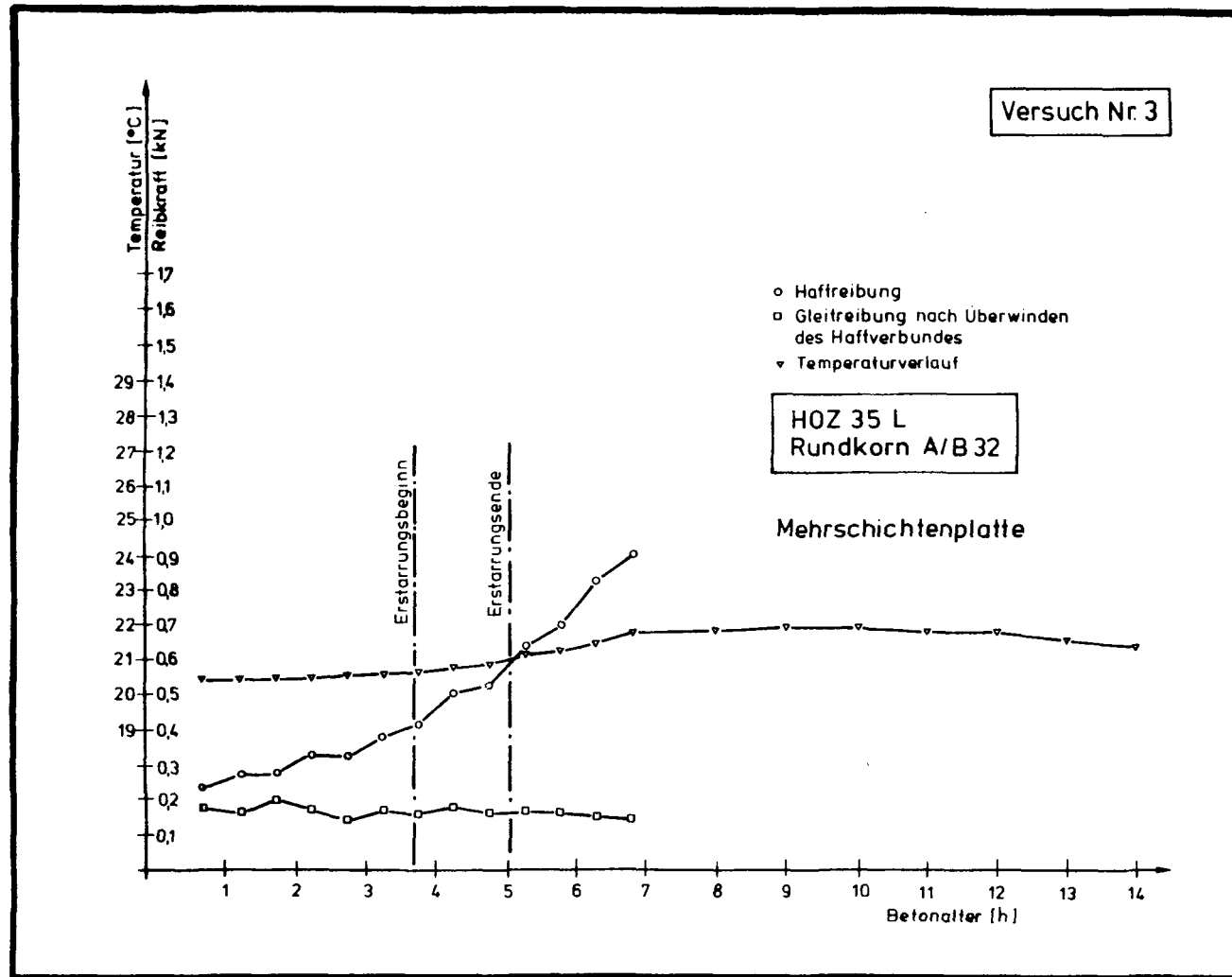


Bild 28: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 3

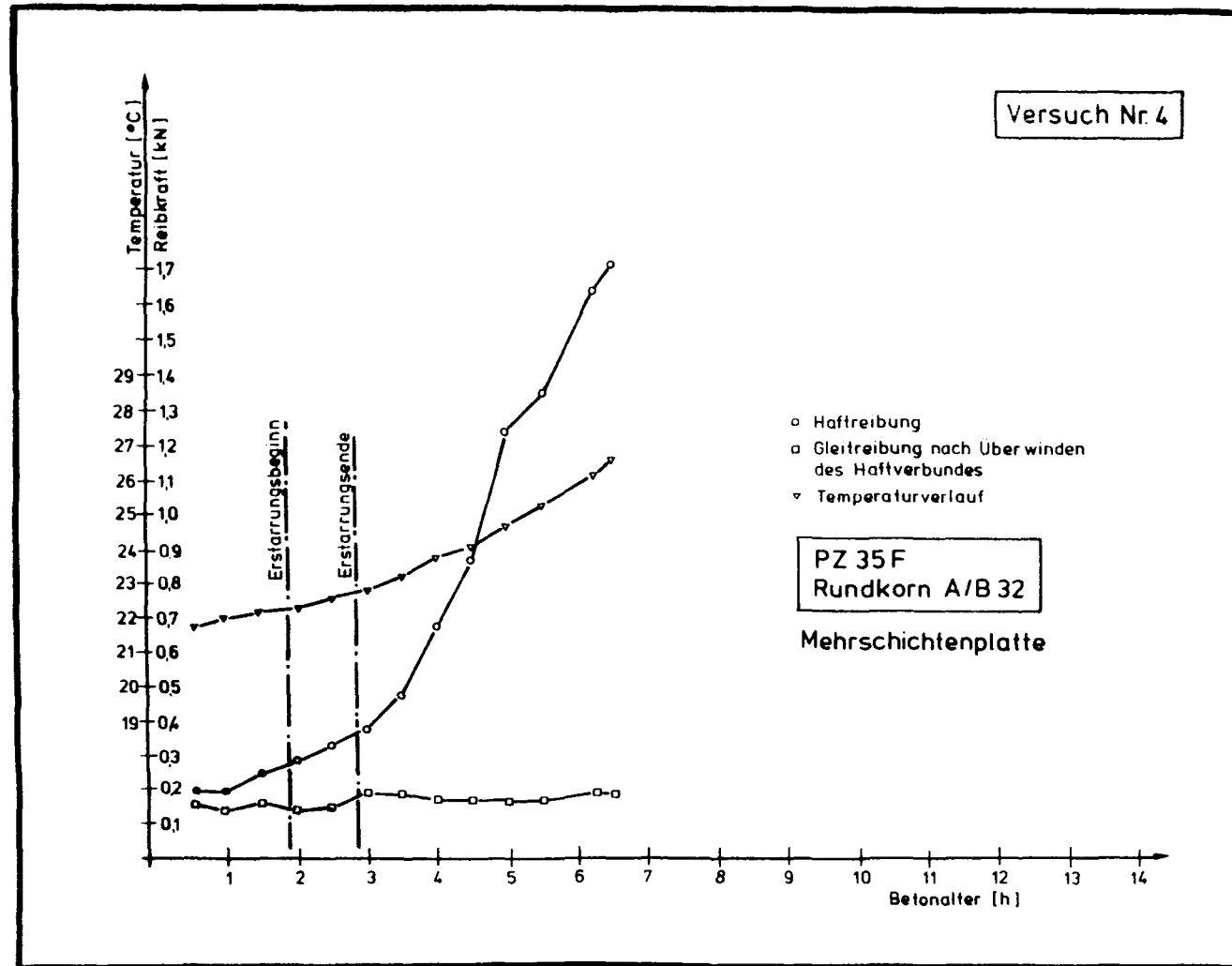


Bild 29: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 4

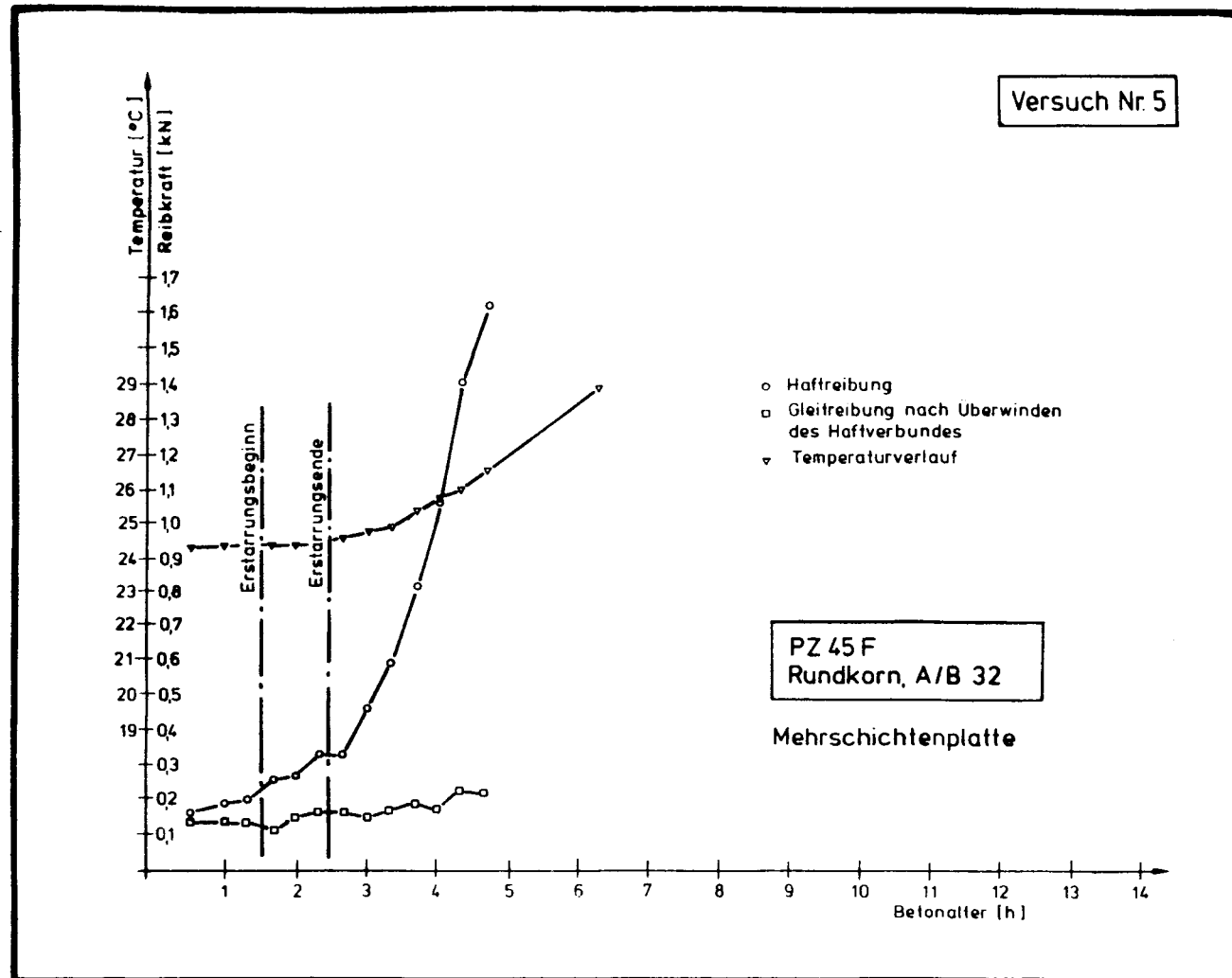


Bild 30: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 5

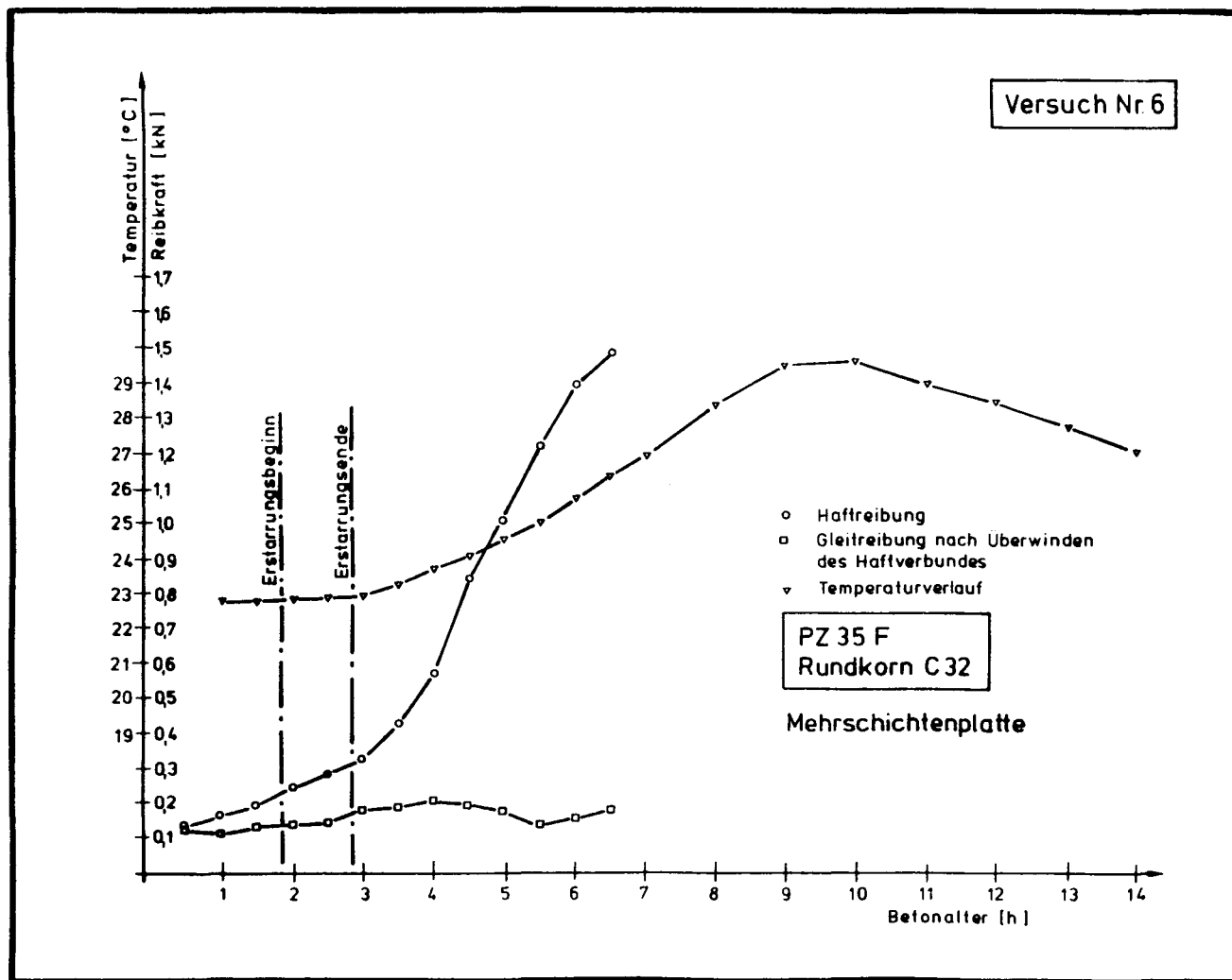


Bild 31: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 6

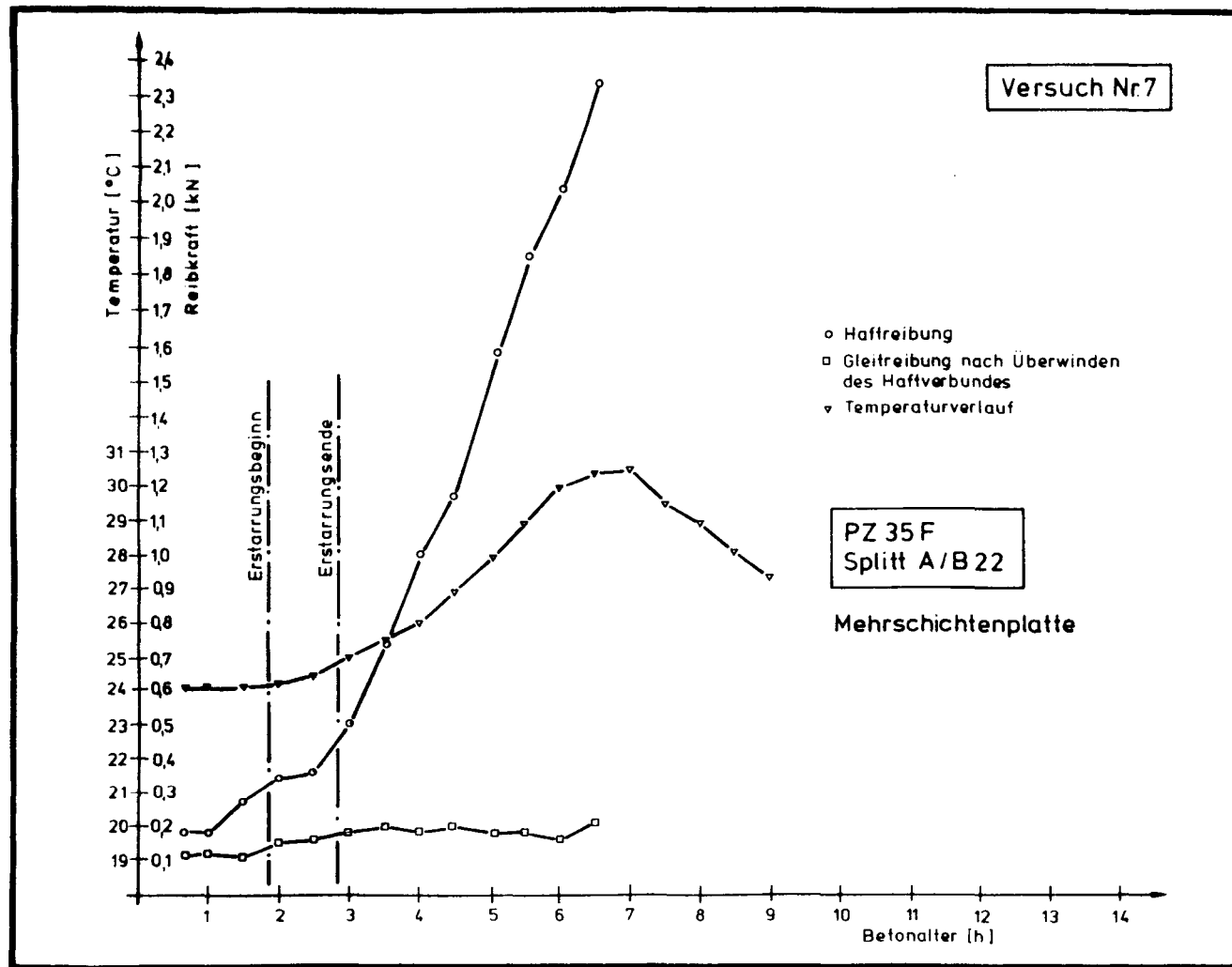


Bild 32: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 7

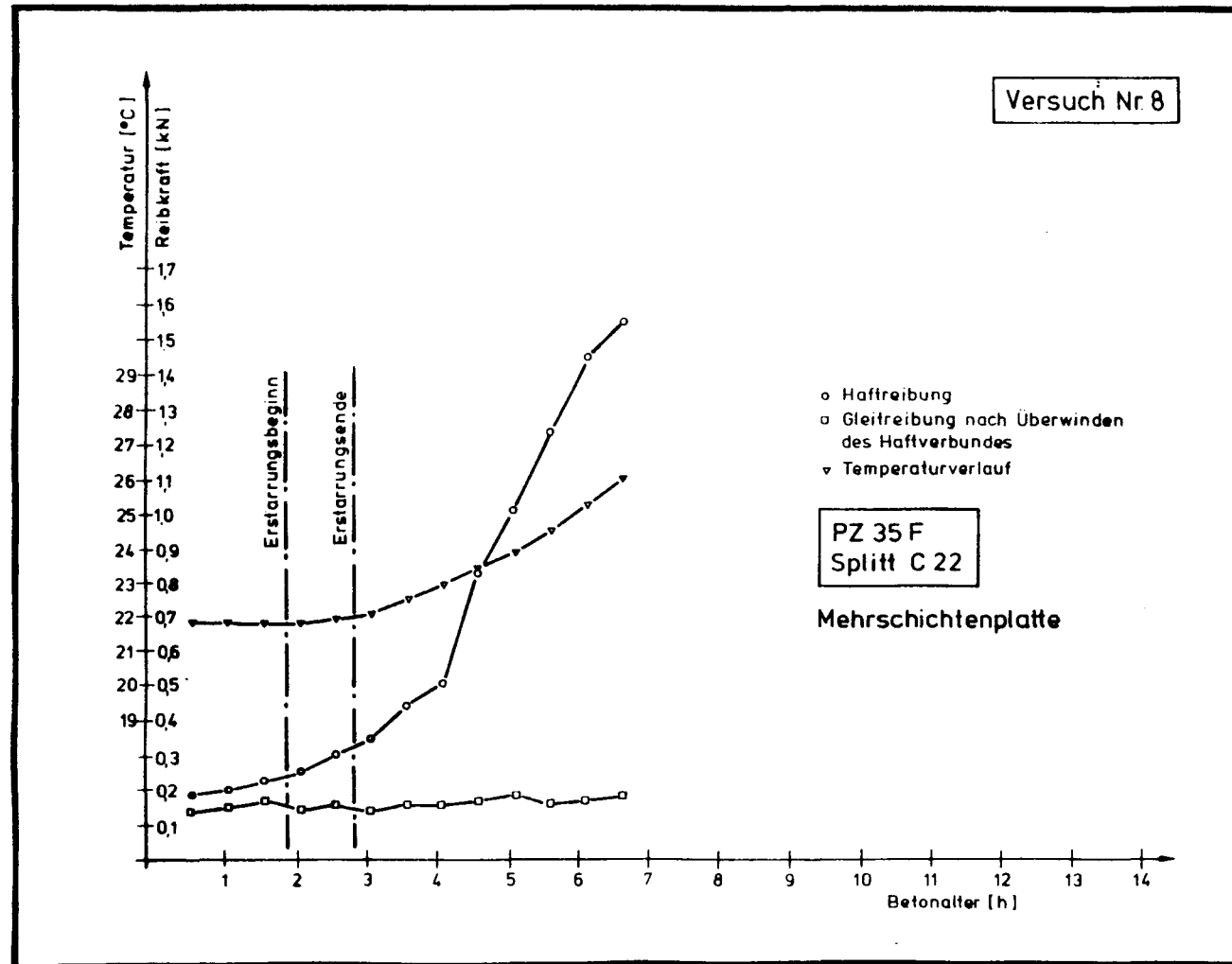


Bild 33: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 8

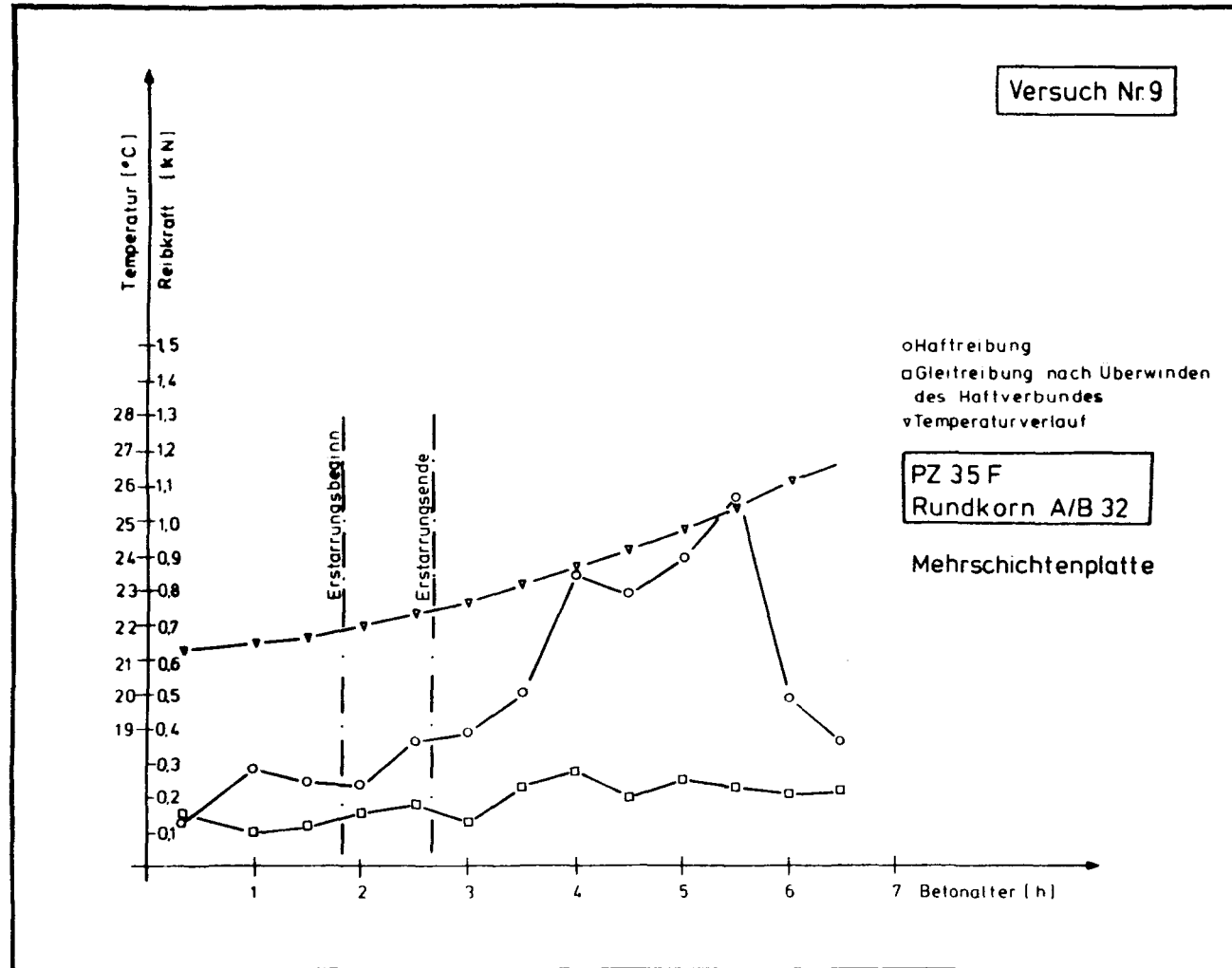


Bild 34: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 9

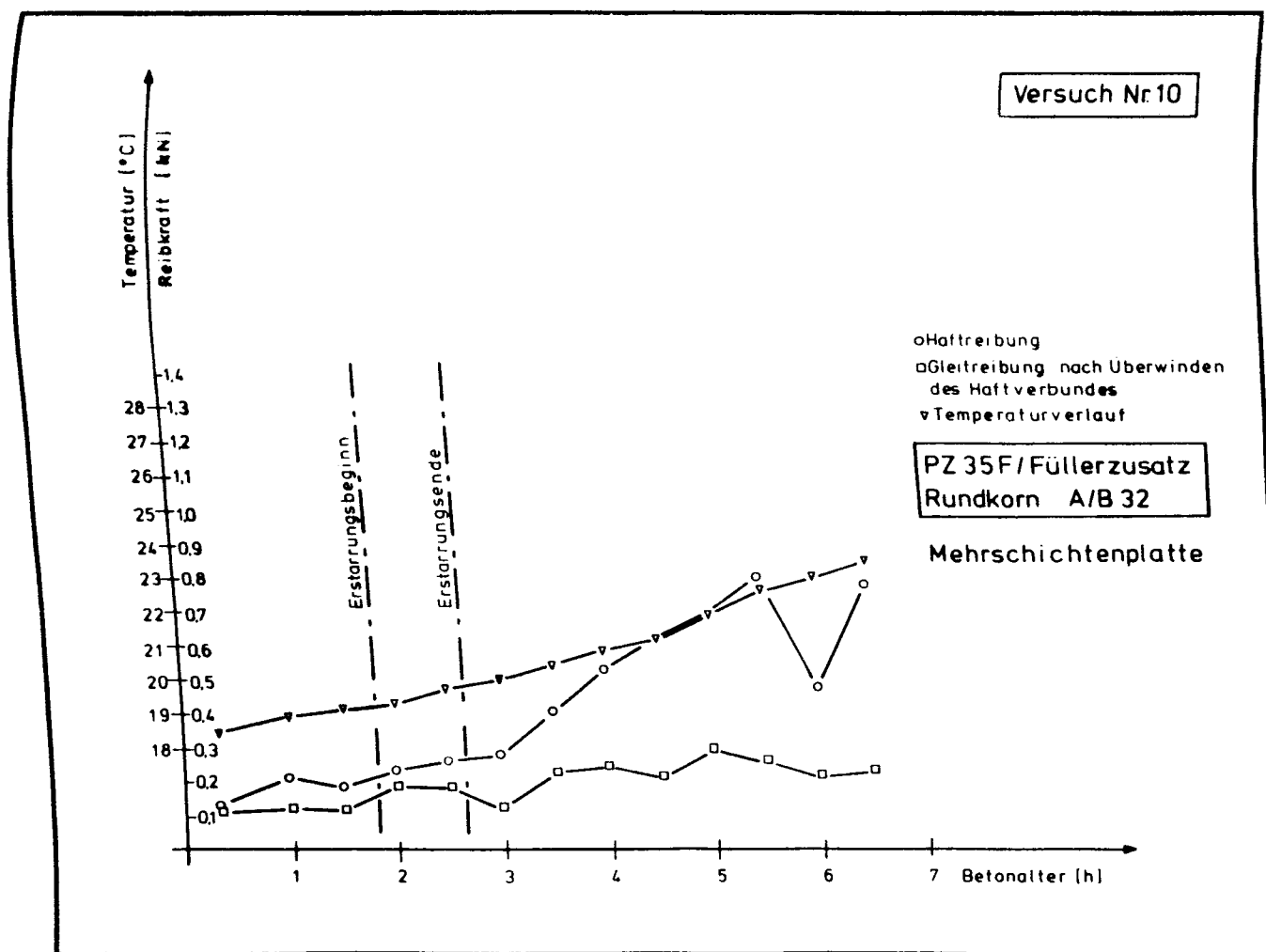


Bild 35: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 10

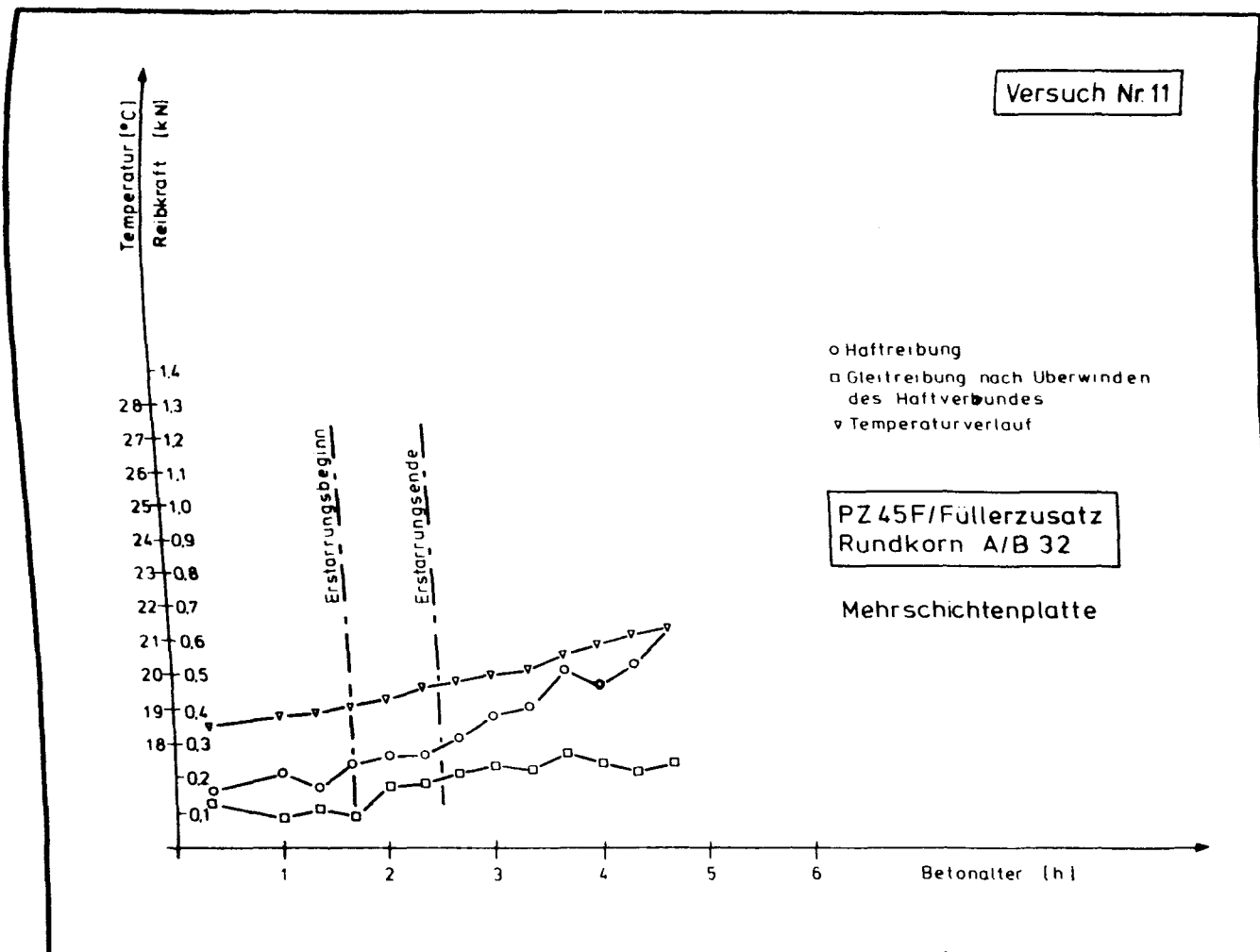


Bild 36: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 11

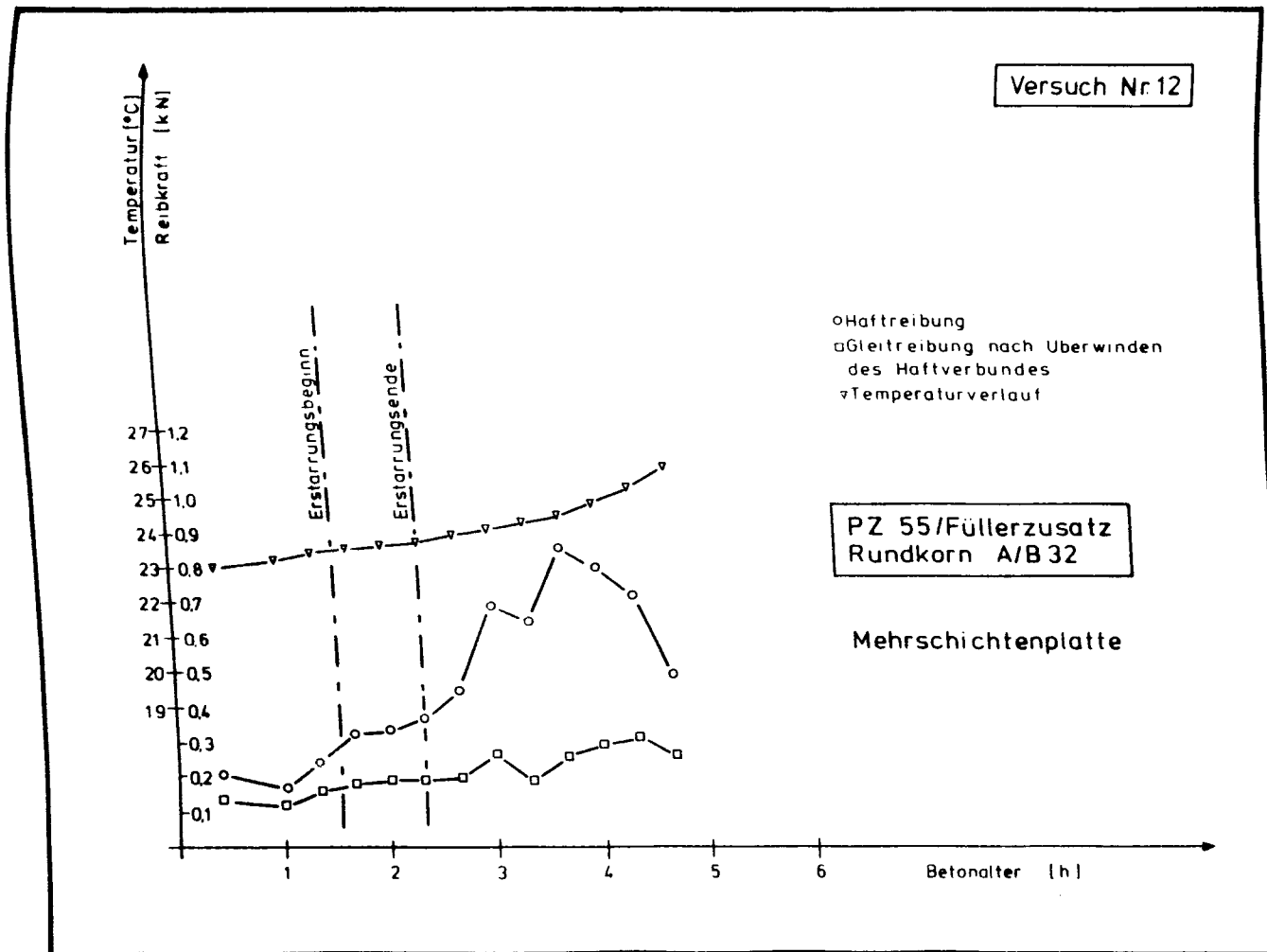


Bild 37: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 12

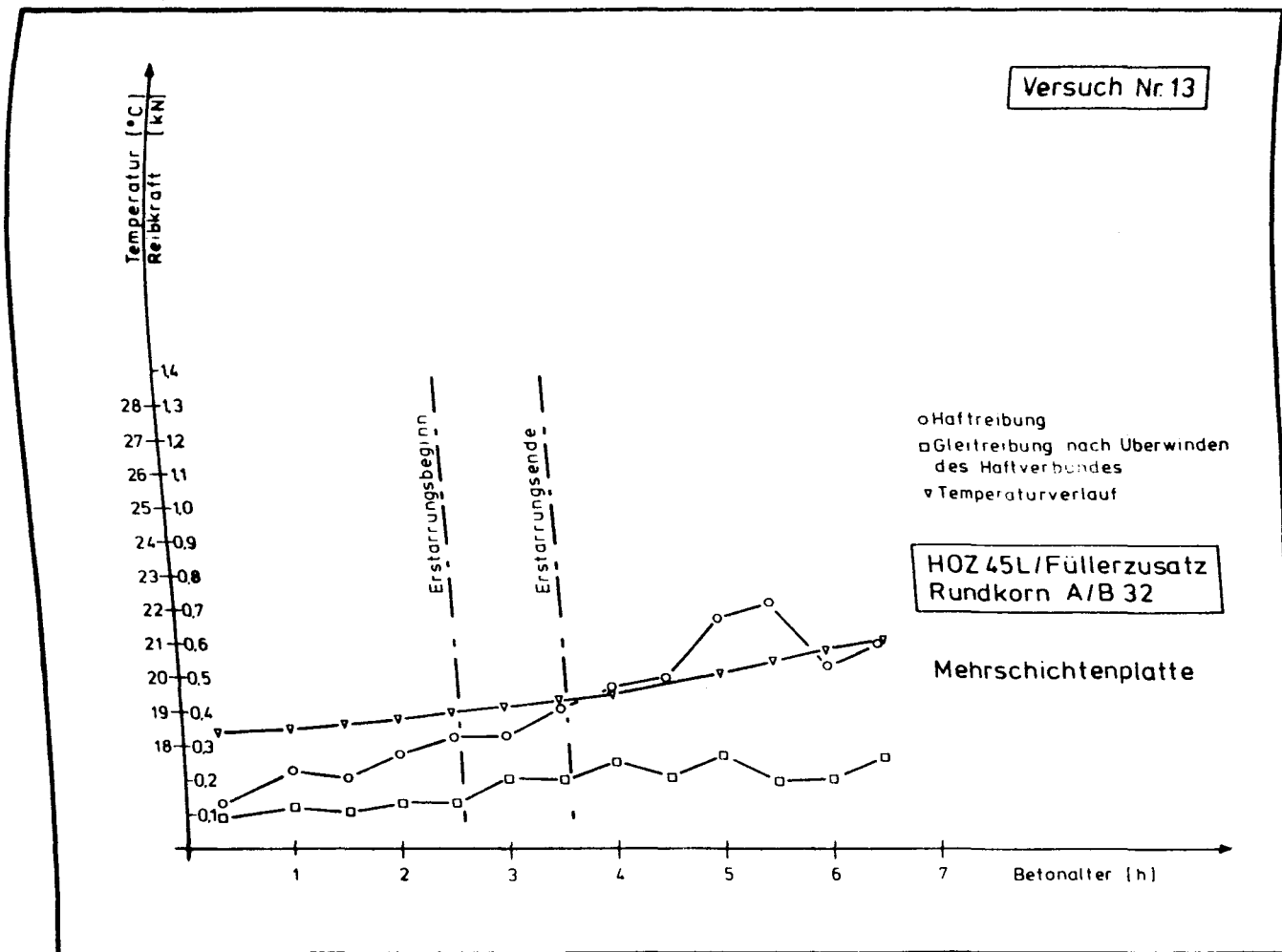


Bild 38: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 13

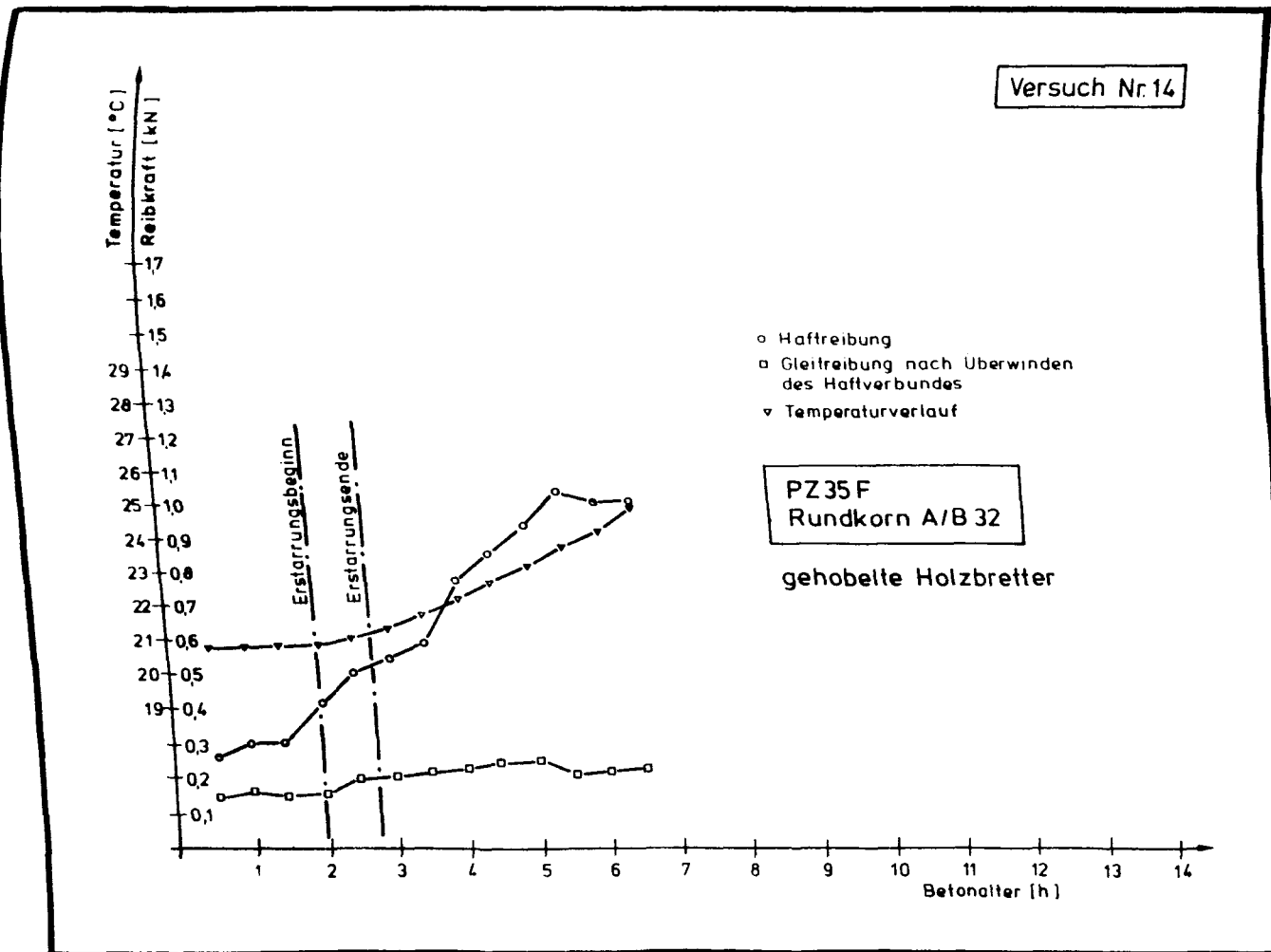


Bild 39: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 14

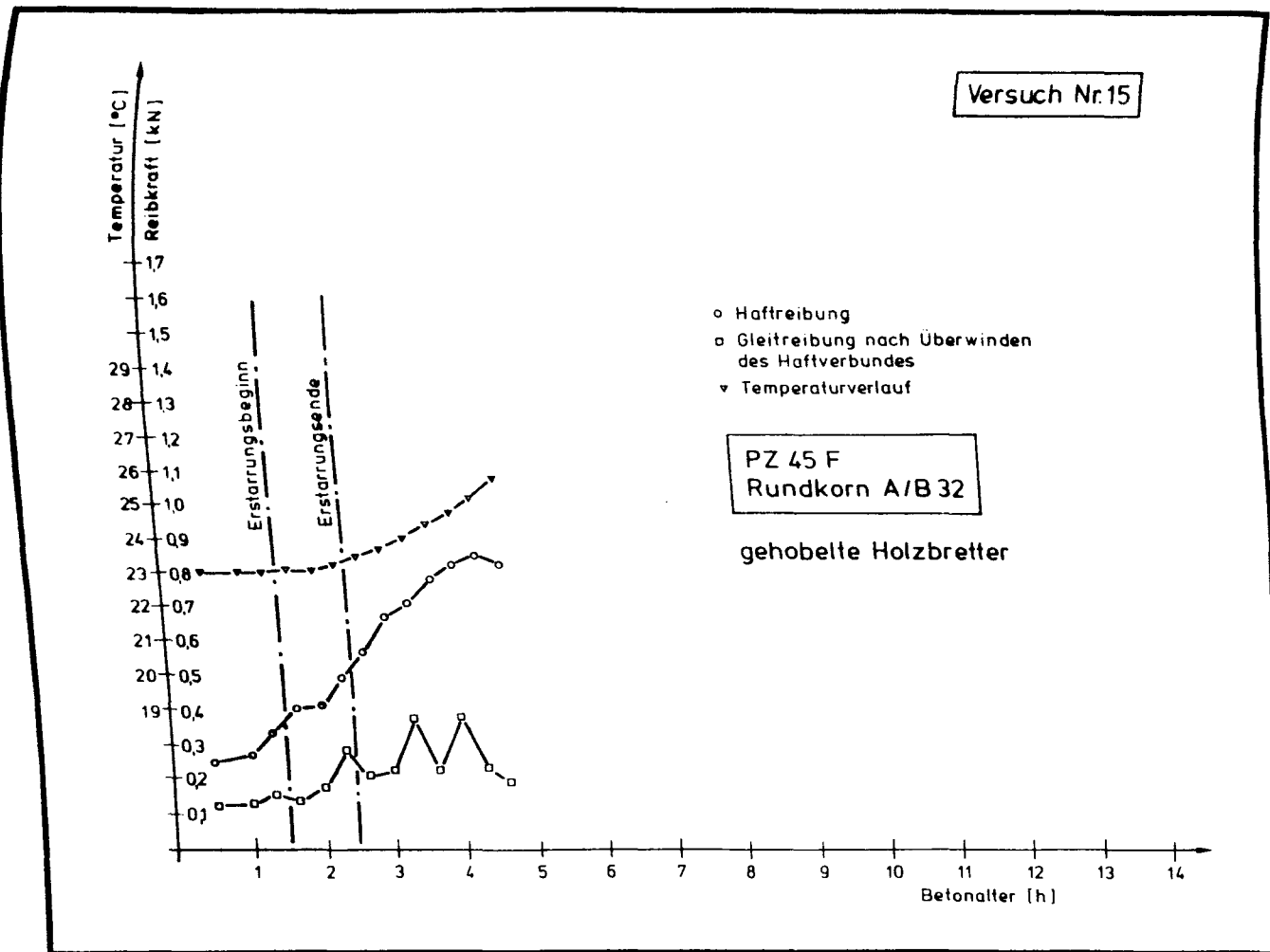


Bild 40: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 15

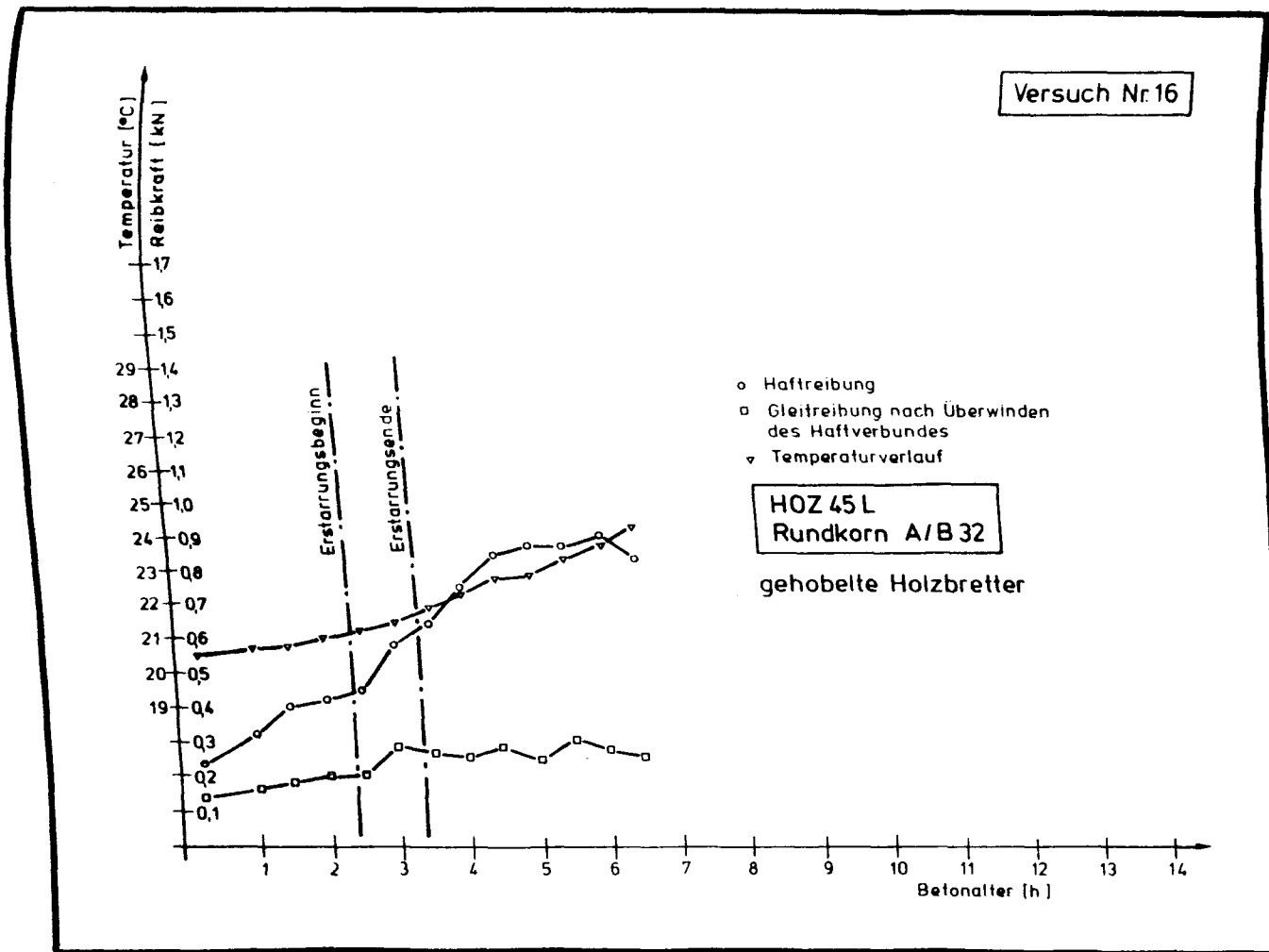


Bild 41: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 16

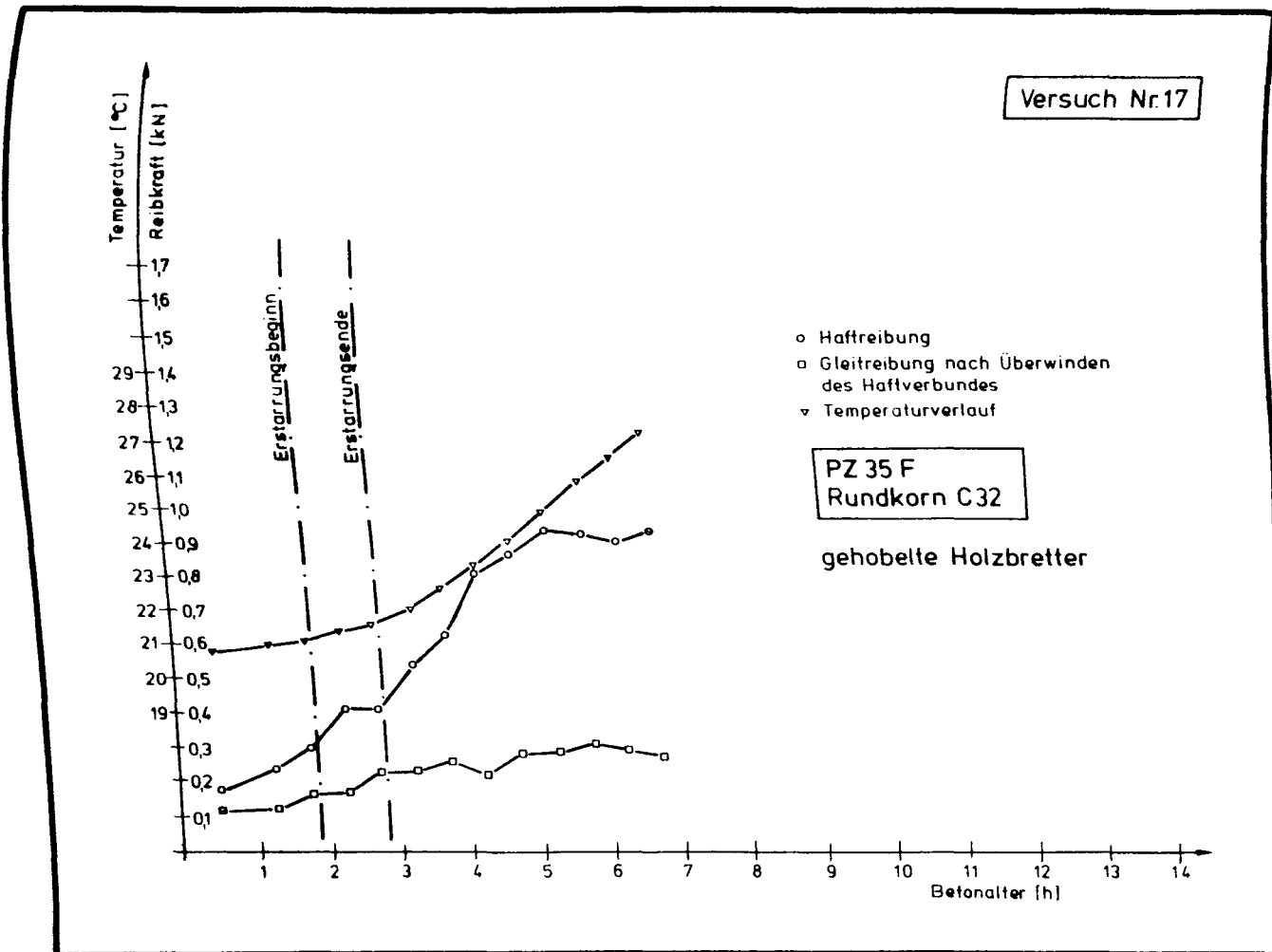


Bild 42: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 17

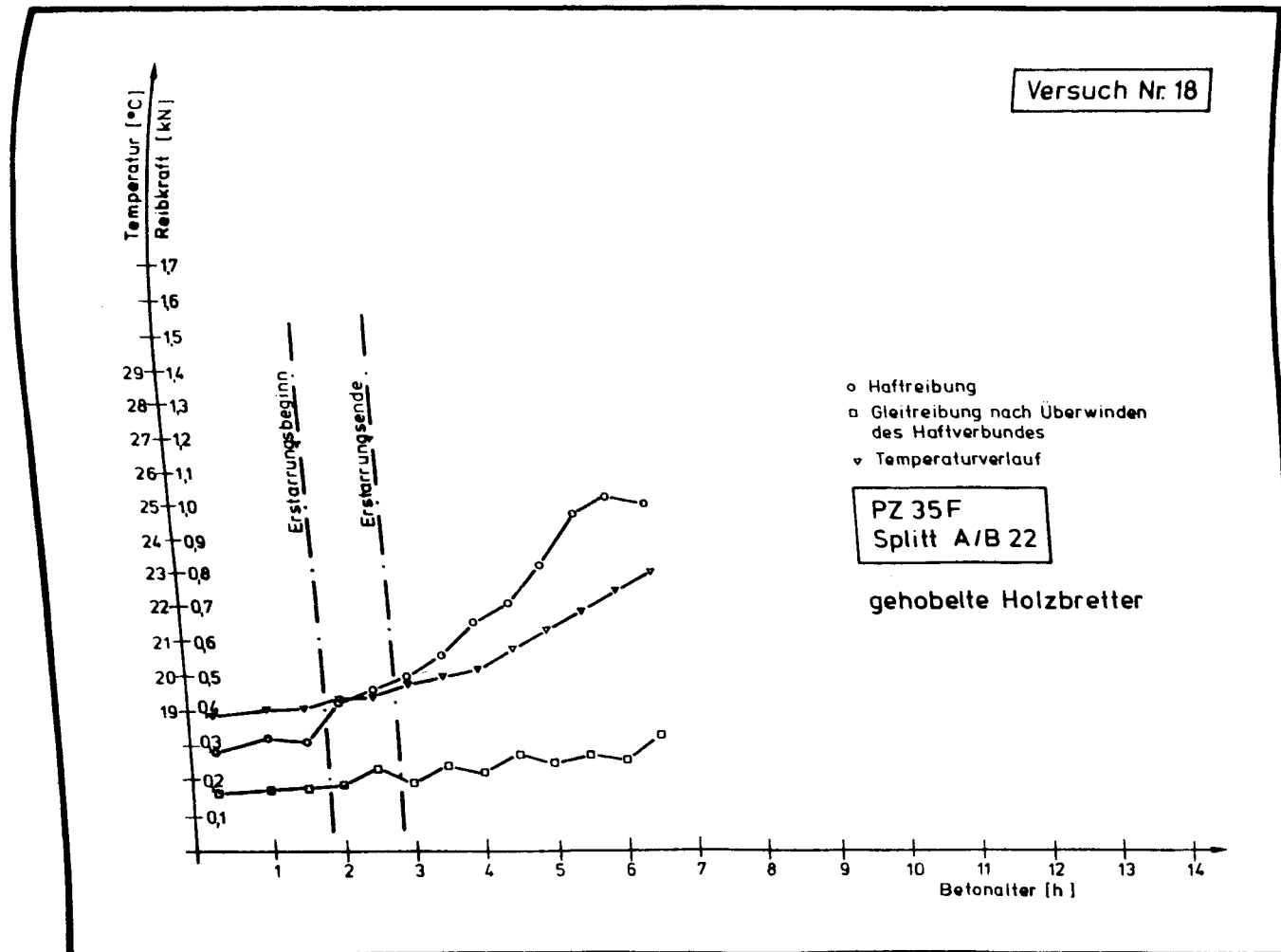


Bild 43: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 18

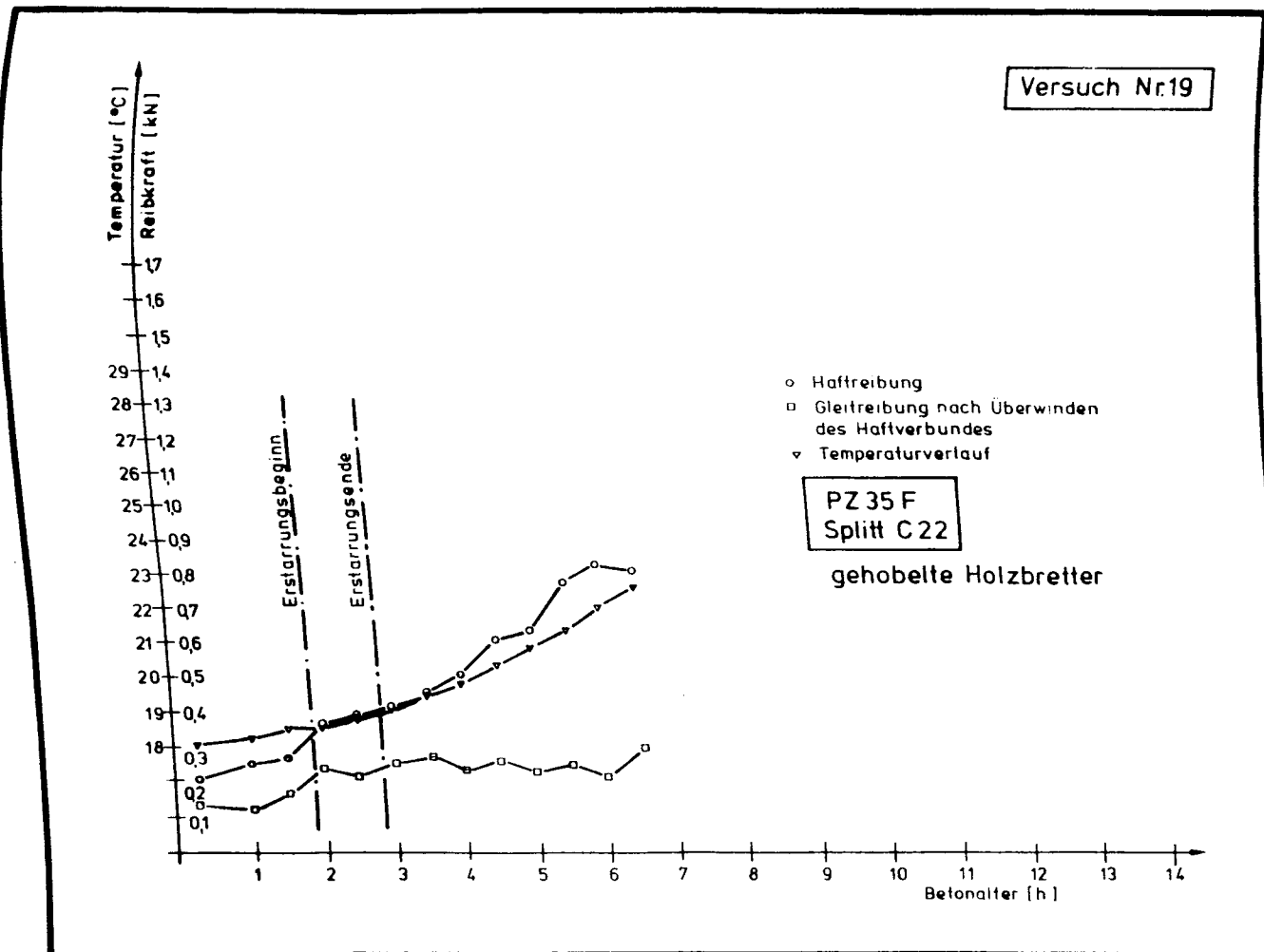


Bild 44: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 19

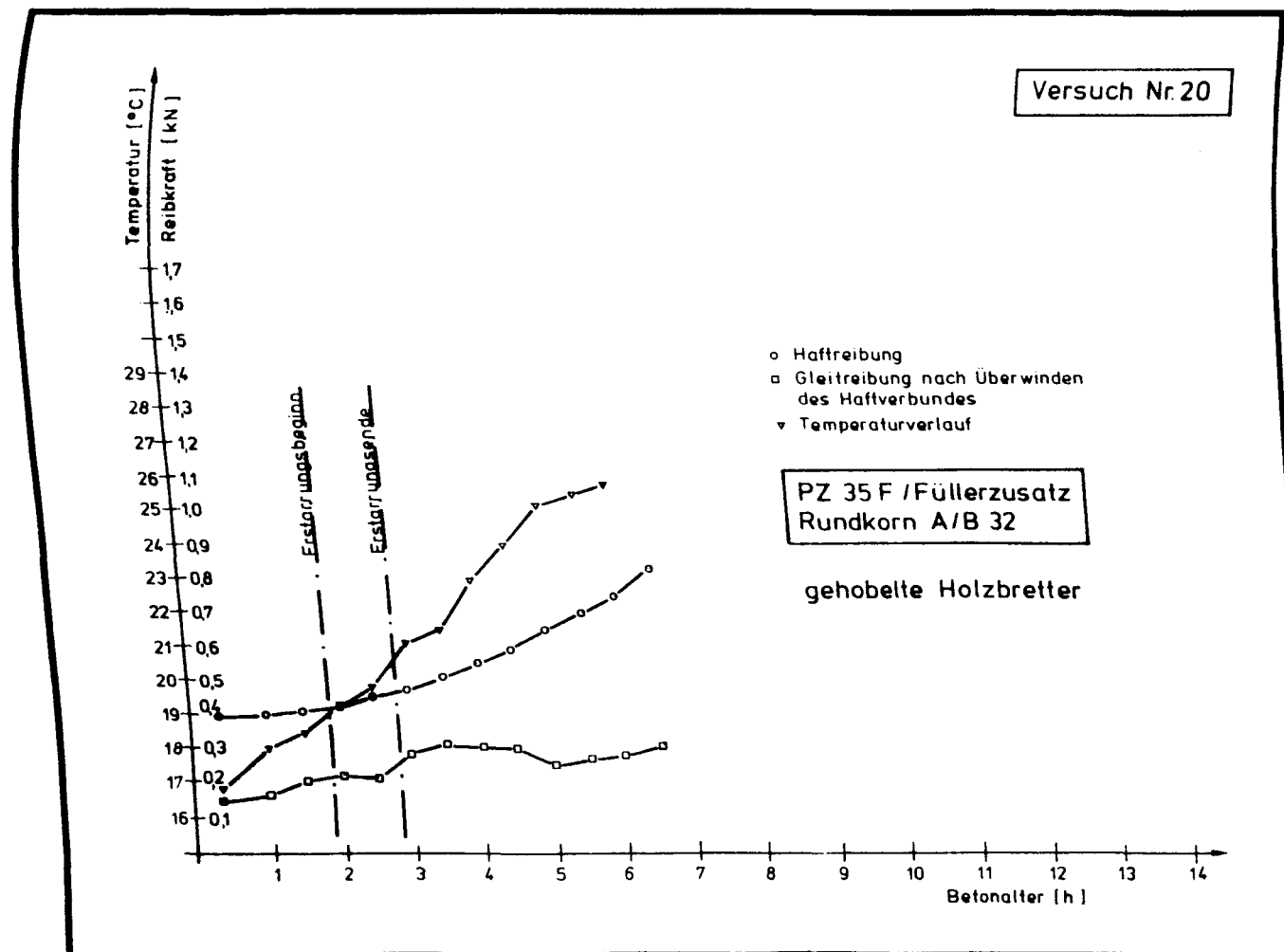


Bild 45: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 20

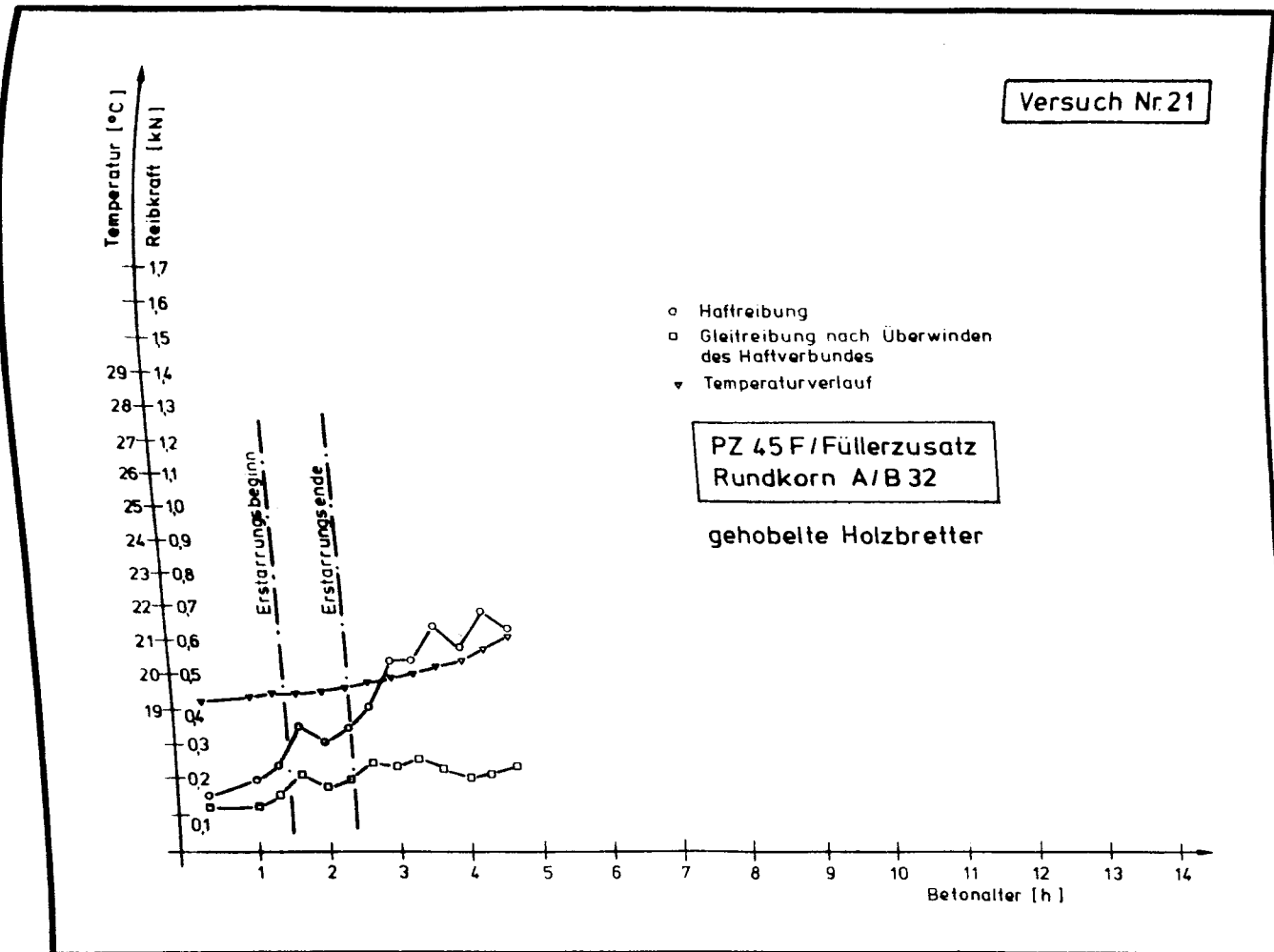


Bild 46: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 21

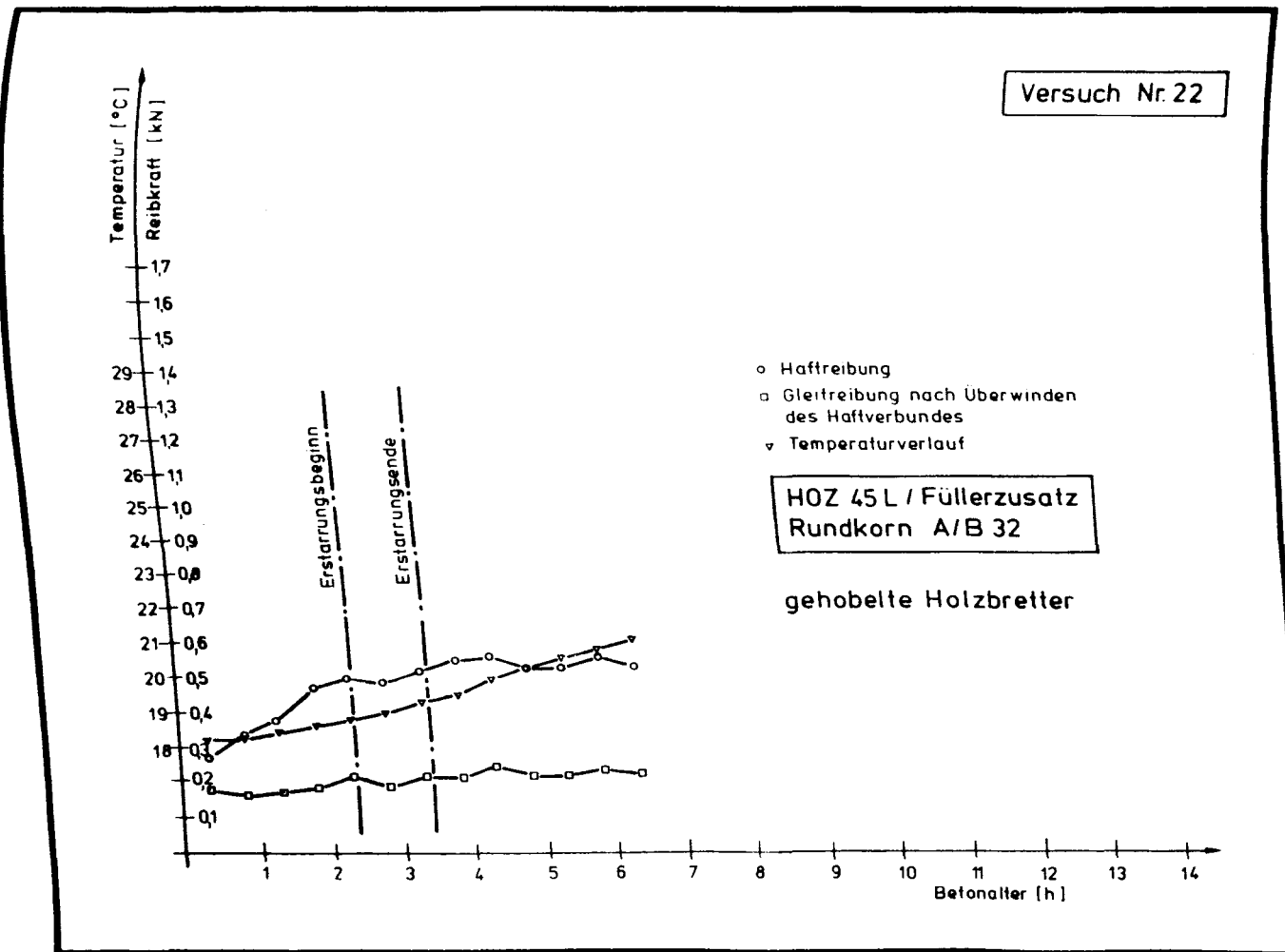


Bild 47: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 22

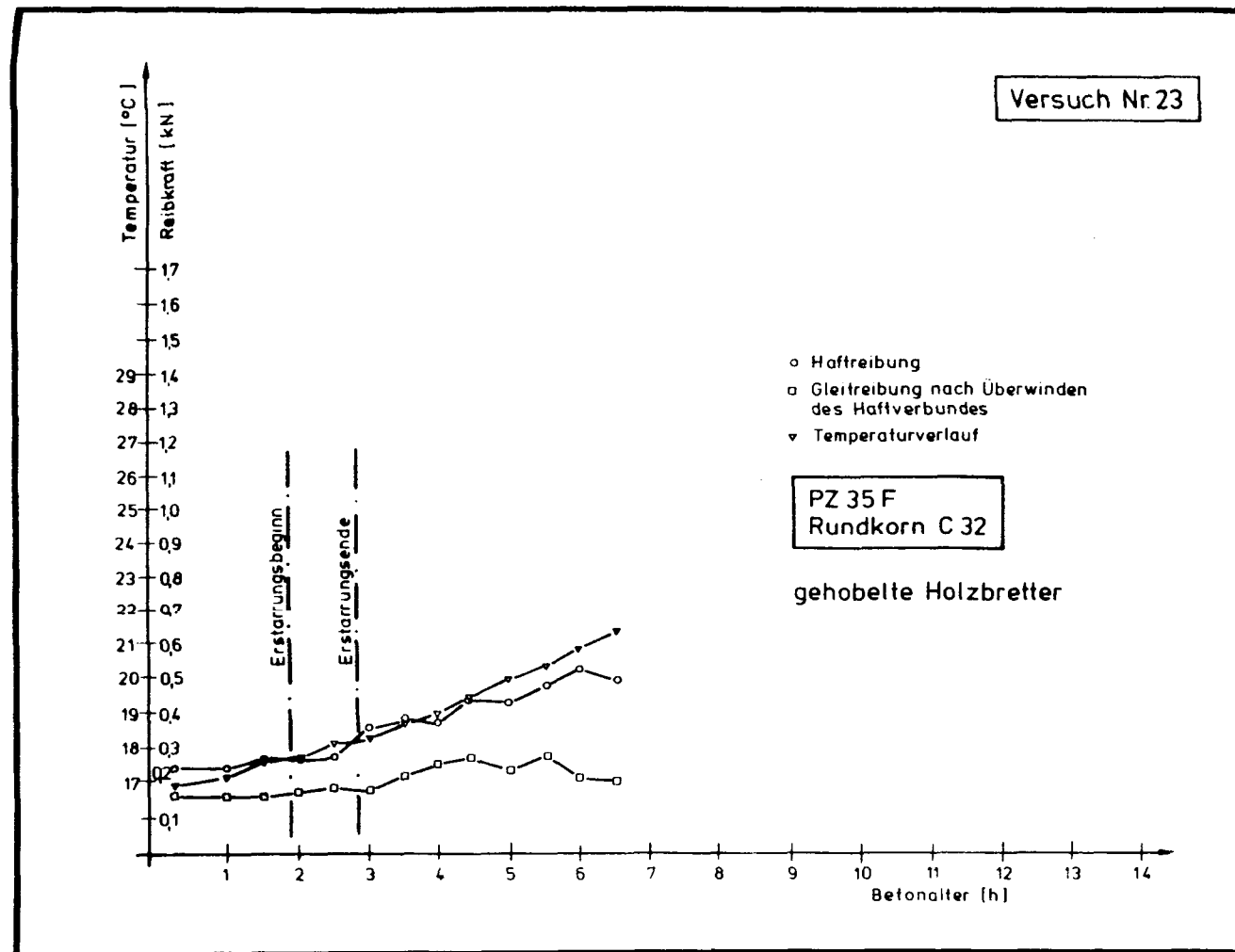


Bild 48: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 23

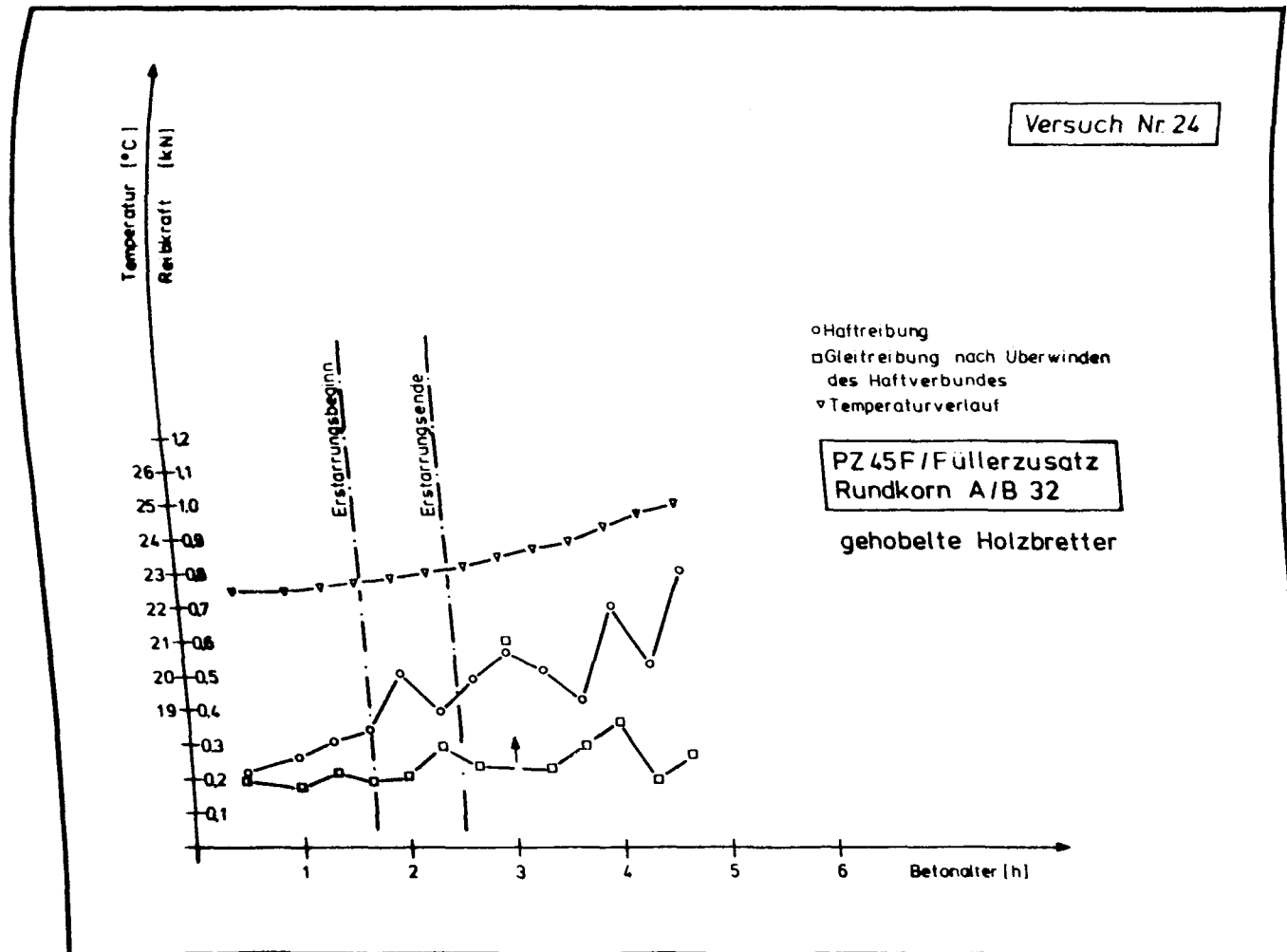


Bild 49: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 24

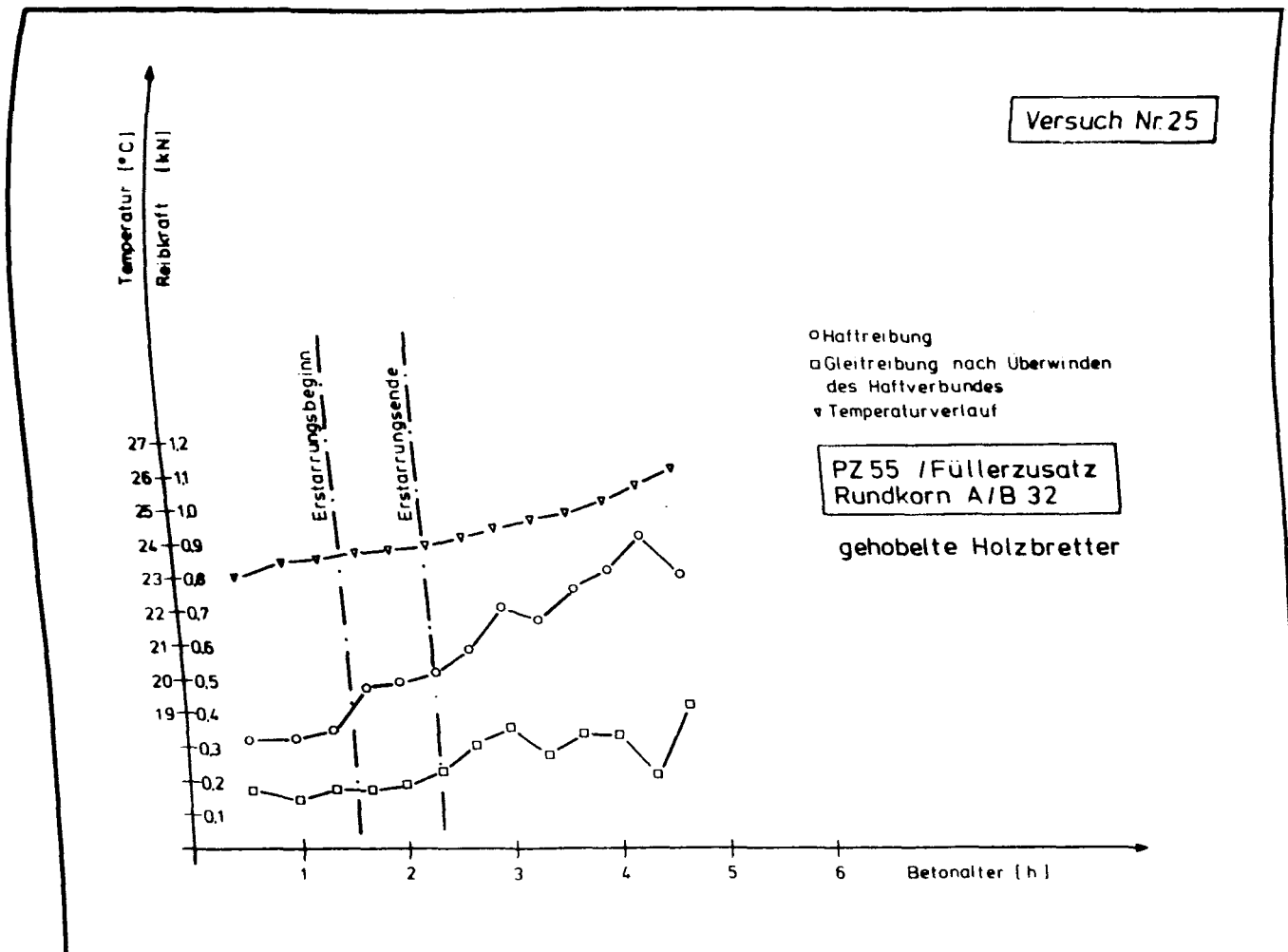


Bild 50: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 25

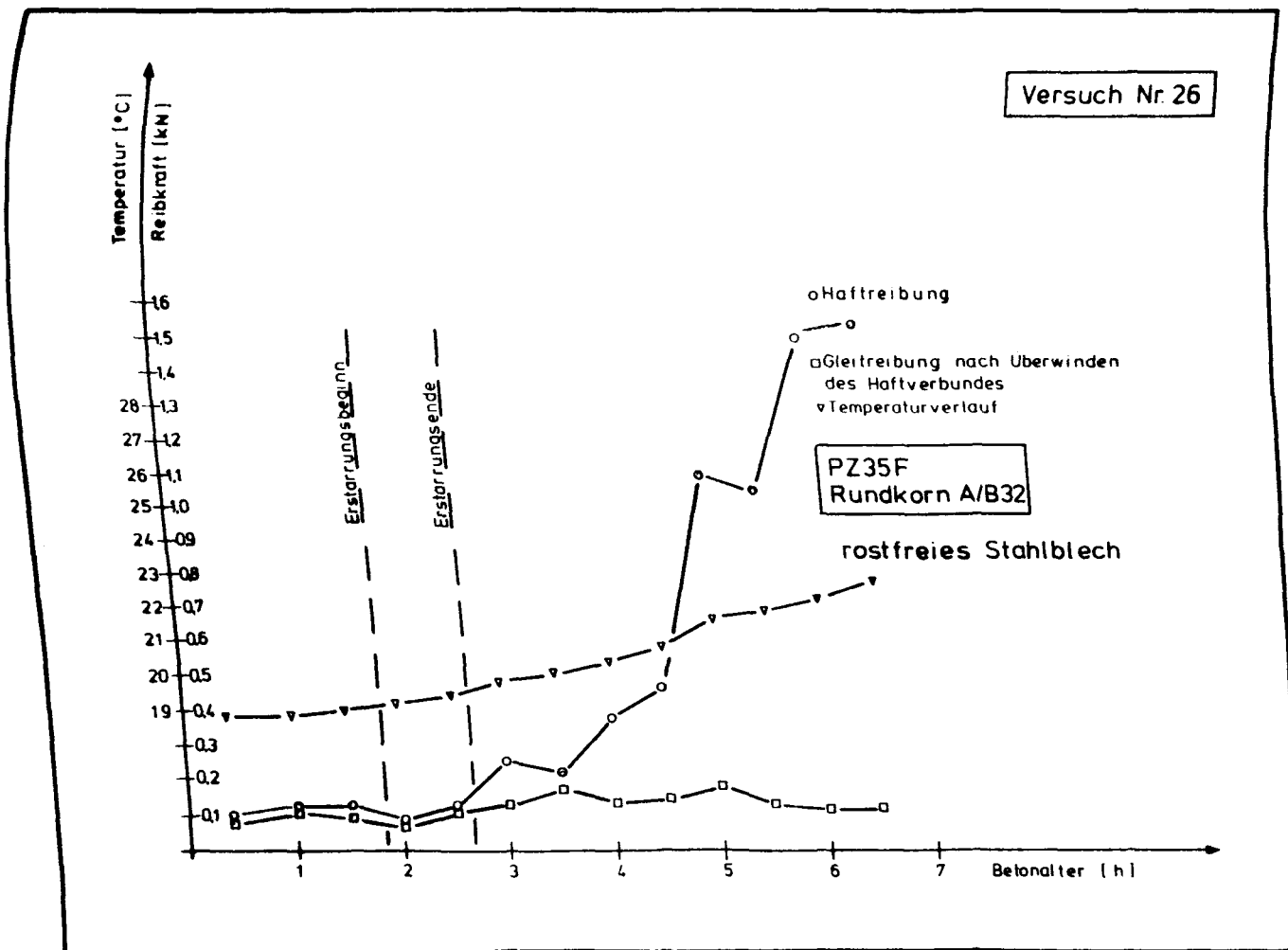


Bild 51: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 26

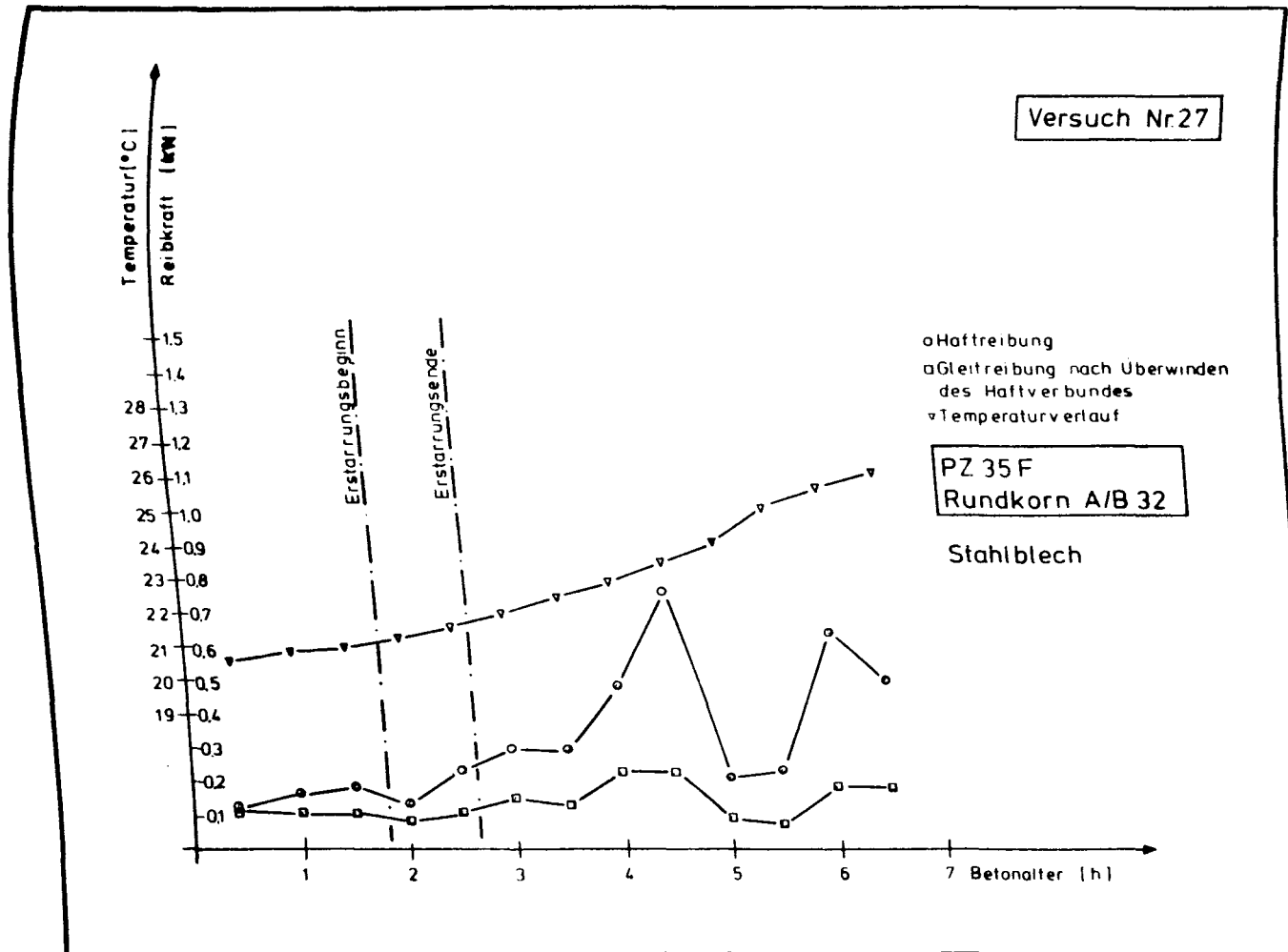


Bild 52: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 27

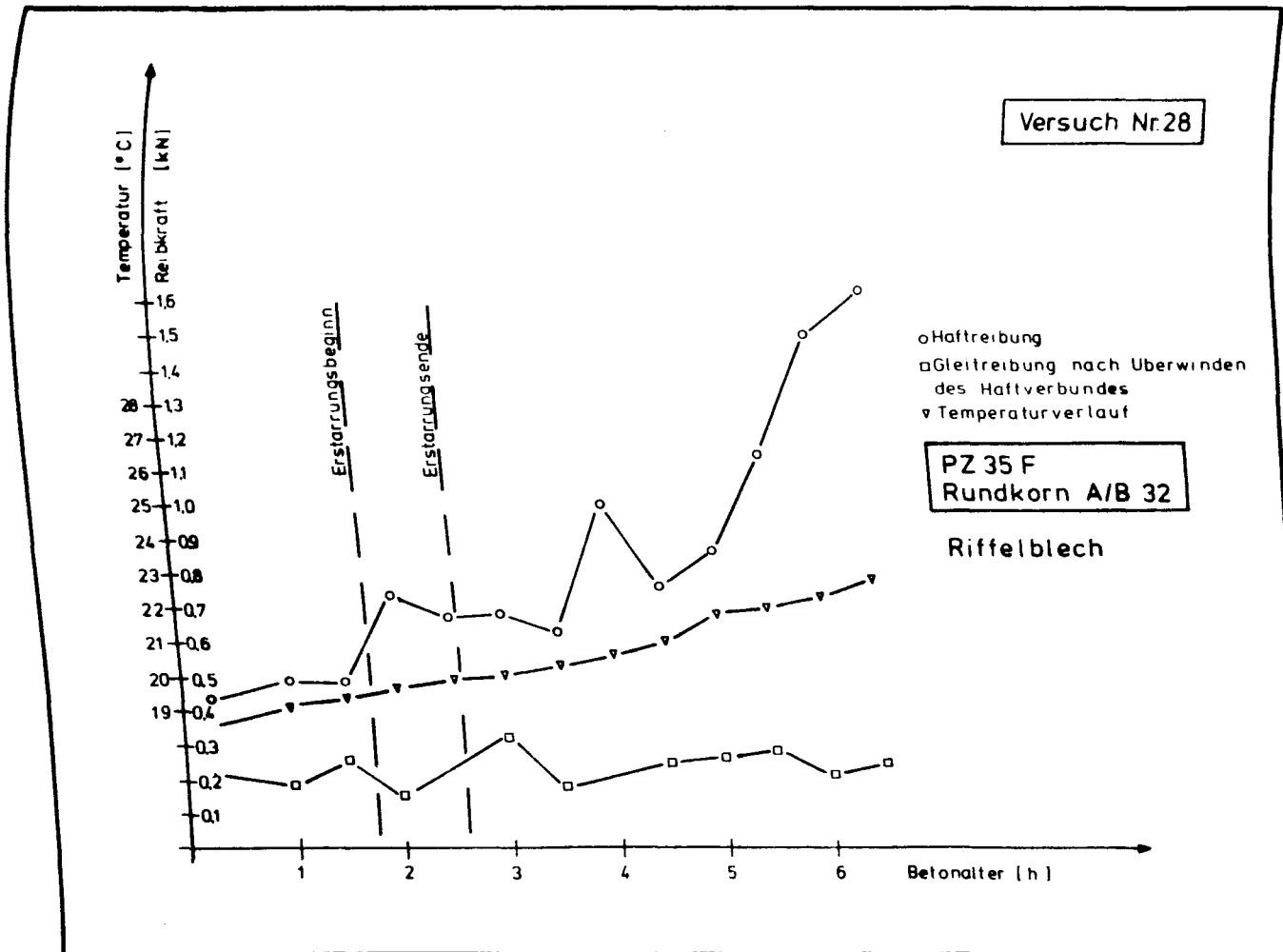


Bild 53: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 28

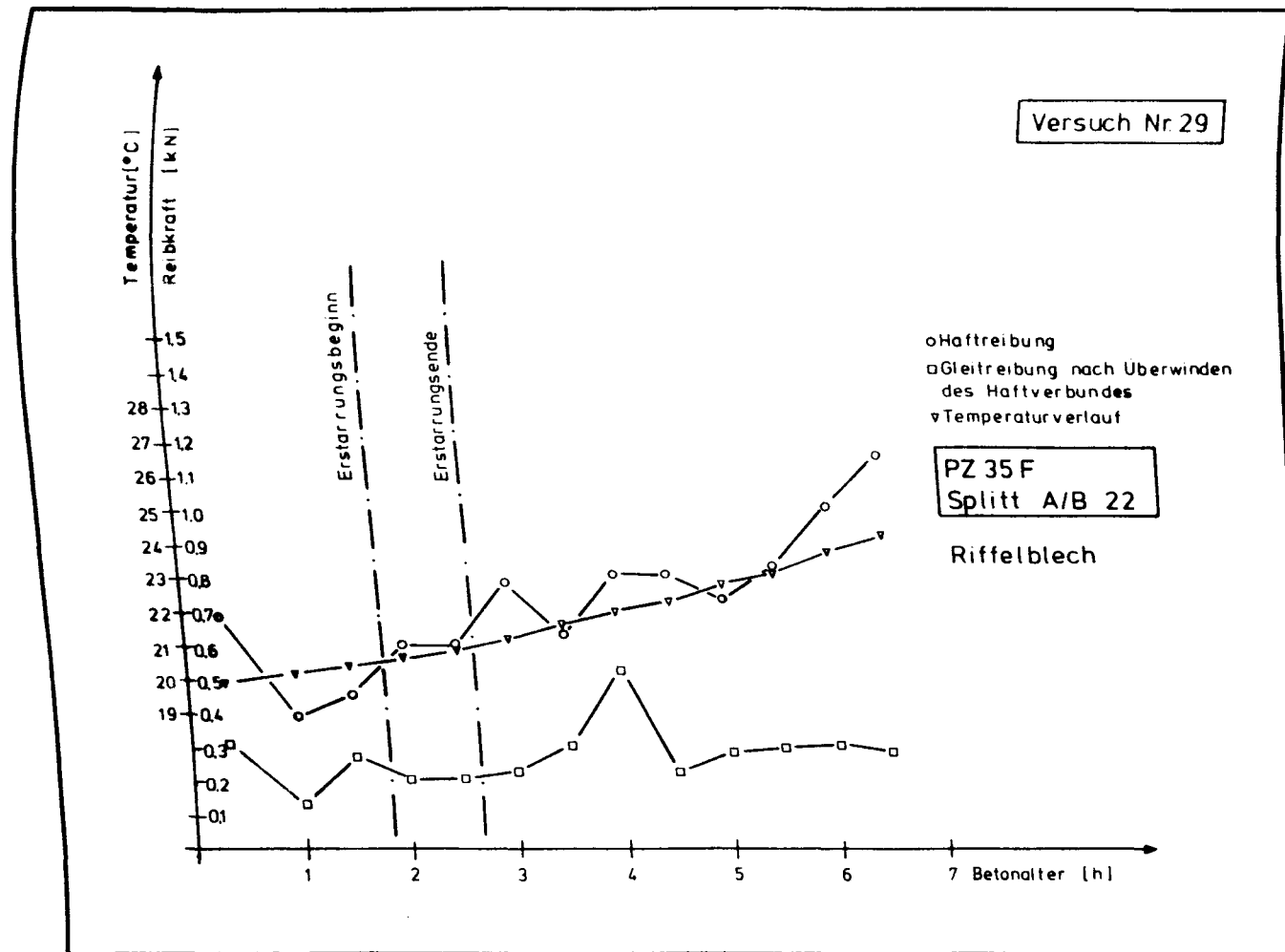


Bild 54: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 29

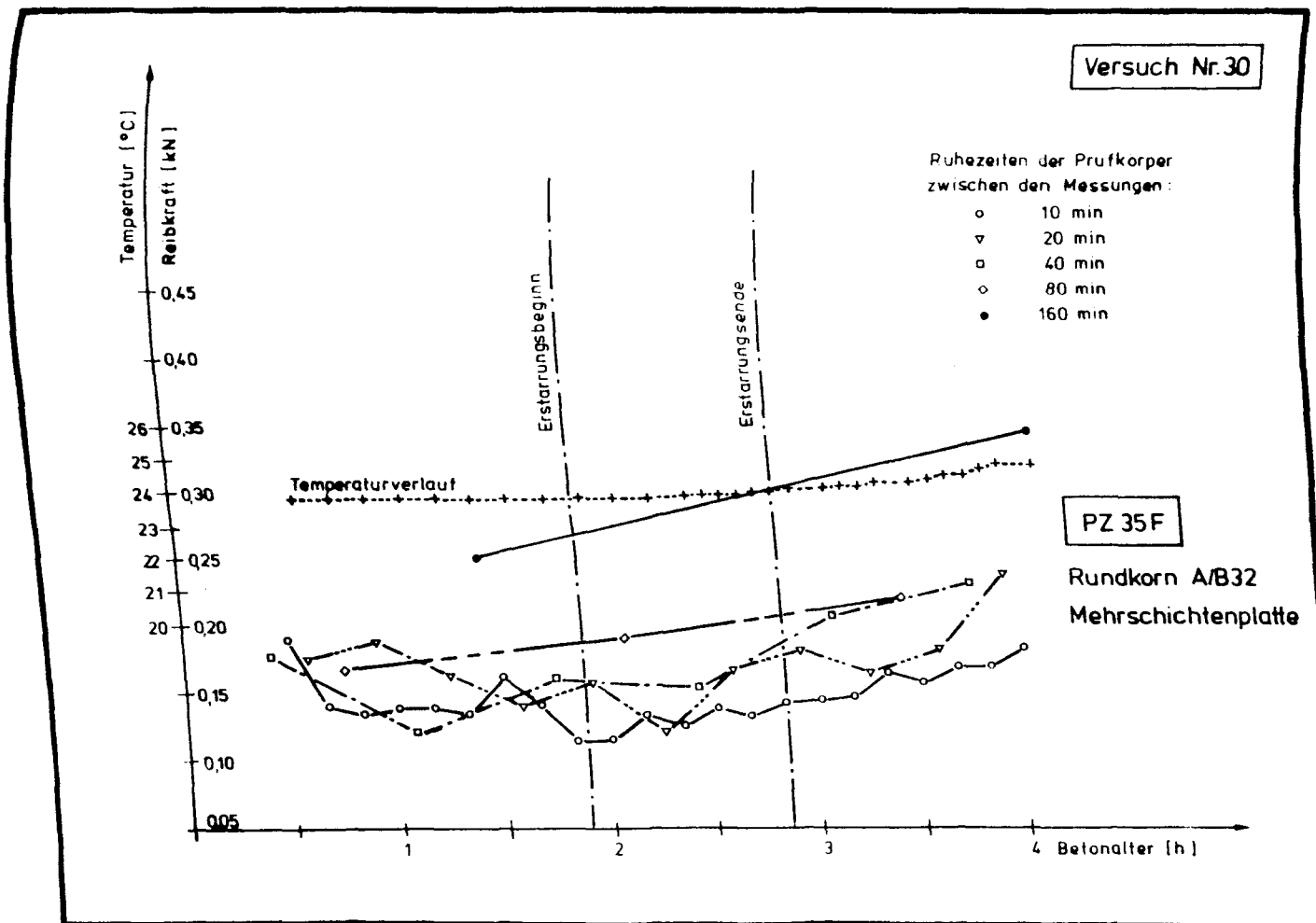


Bild 55: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 30

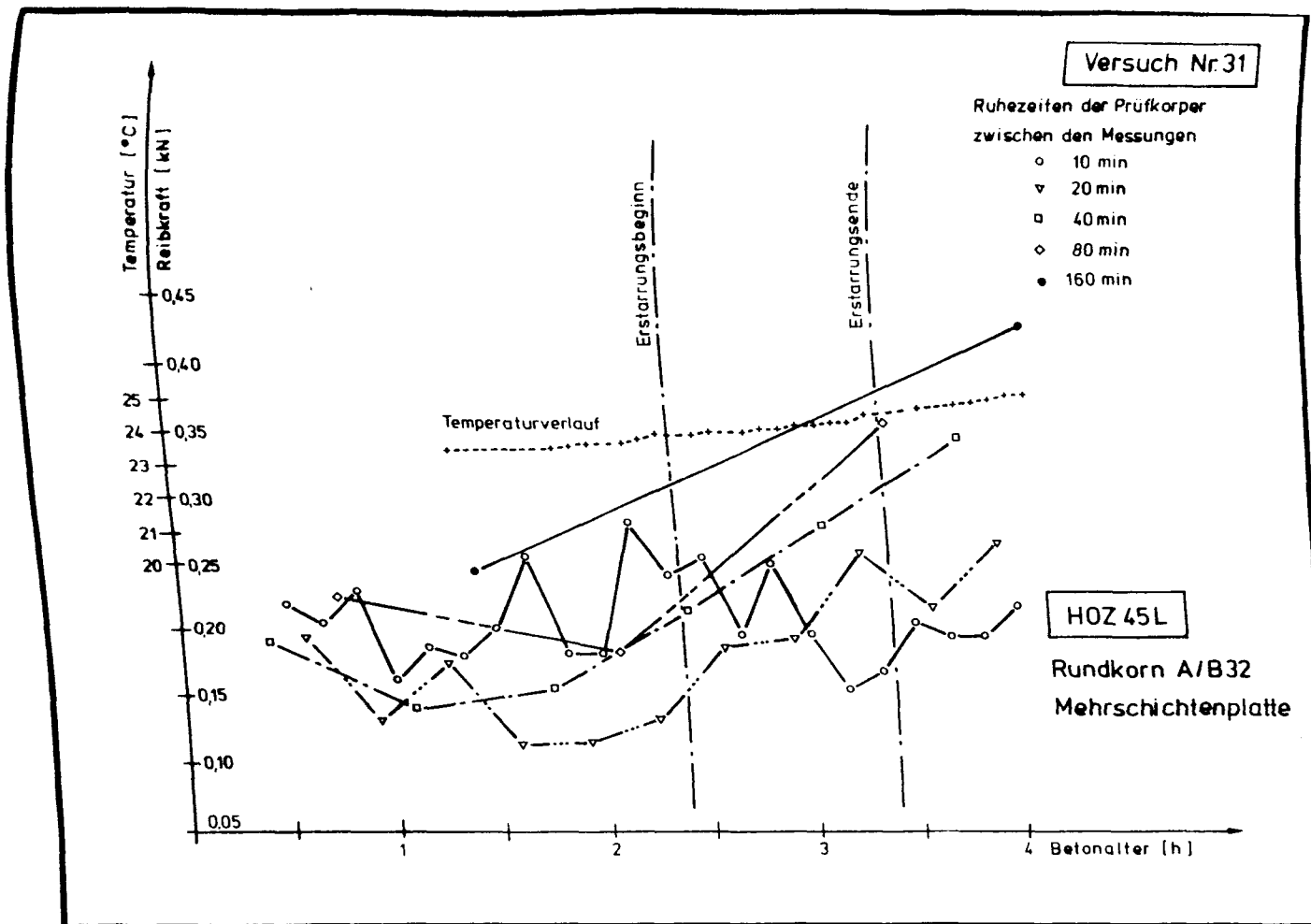


Bild 56: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 31

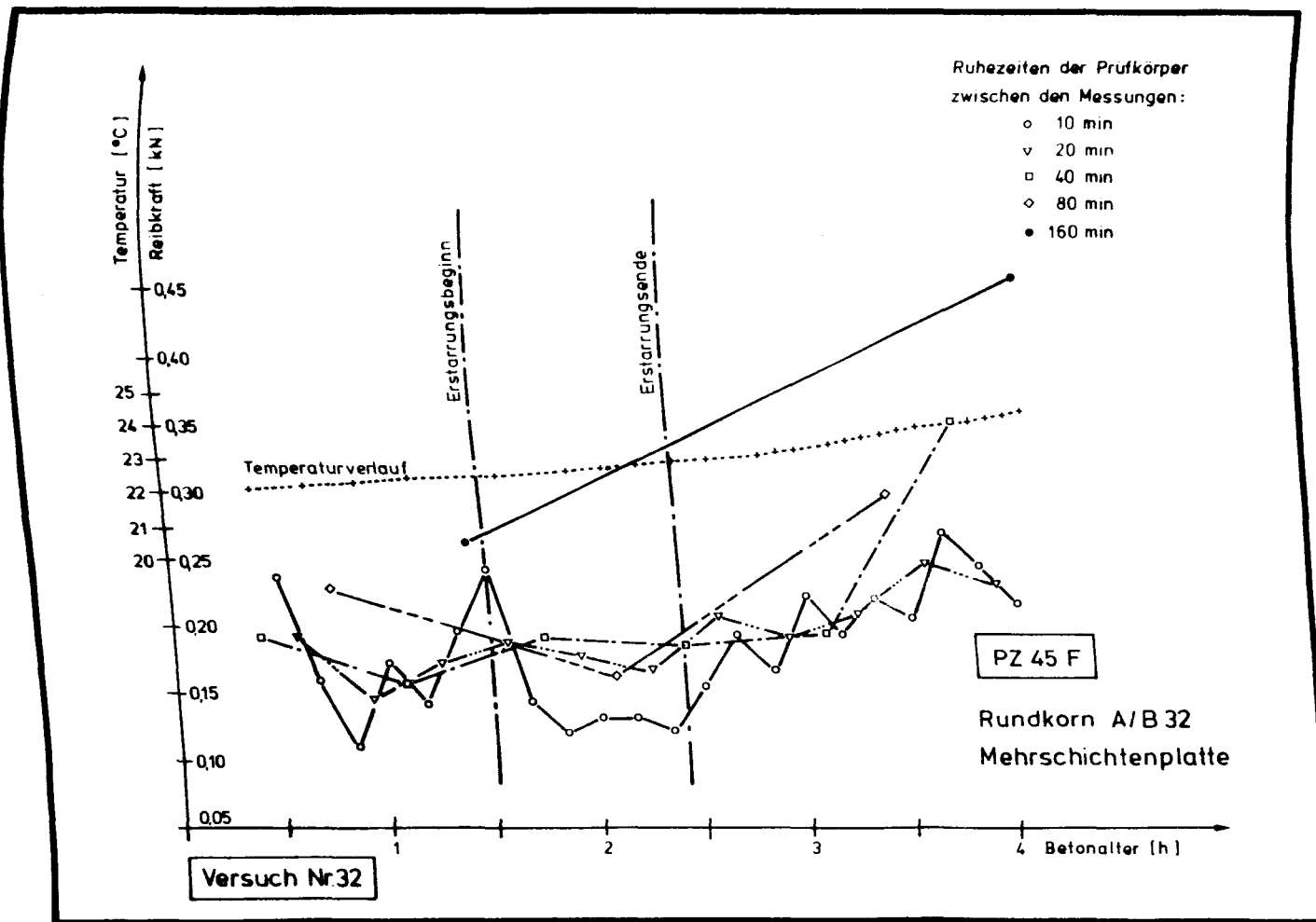


Bild 57: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 32

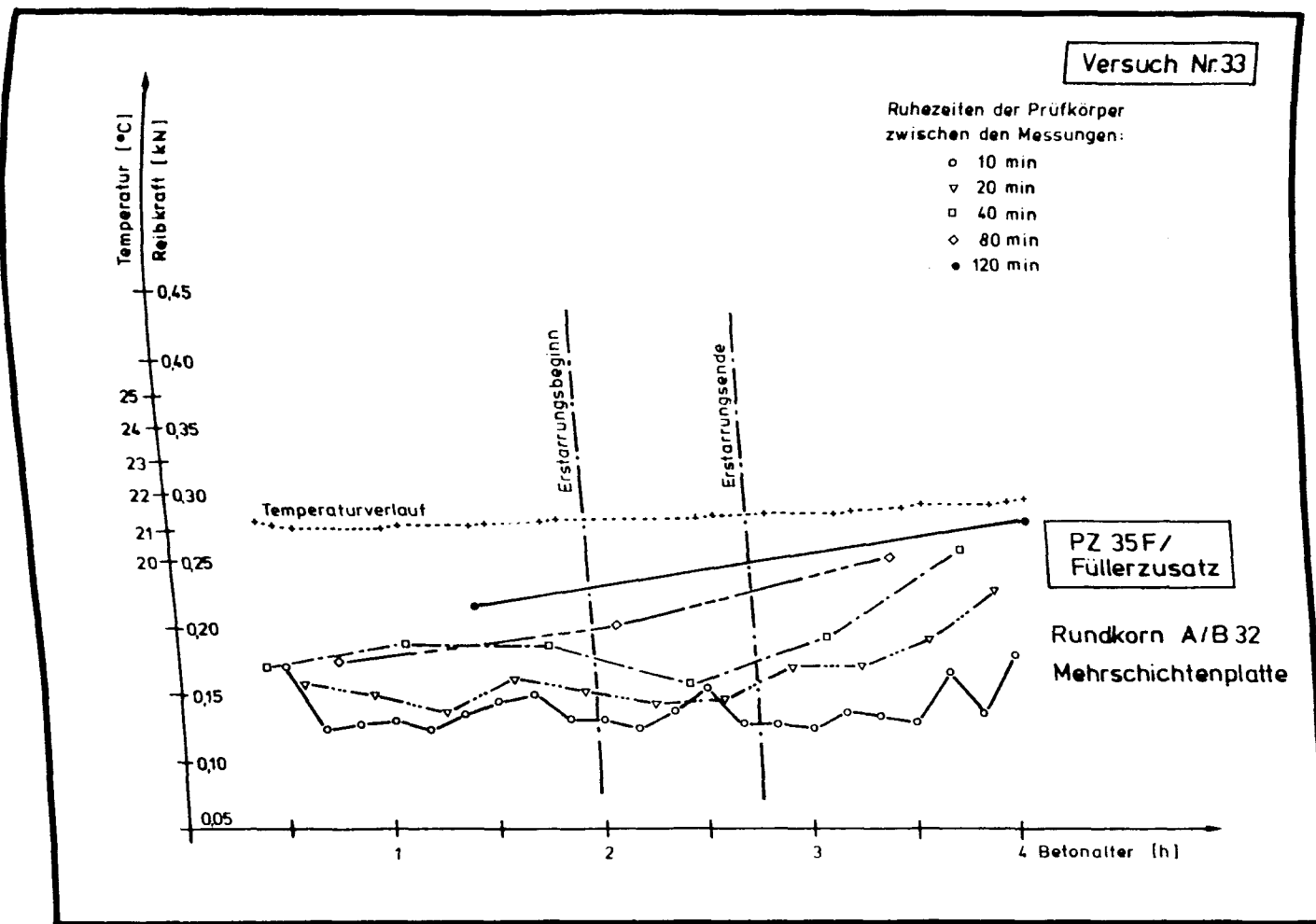


Bild 58: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 33

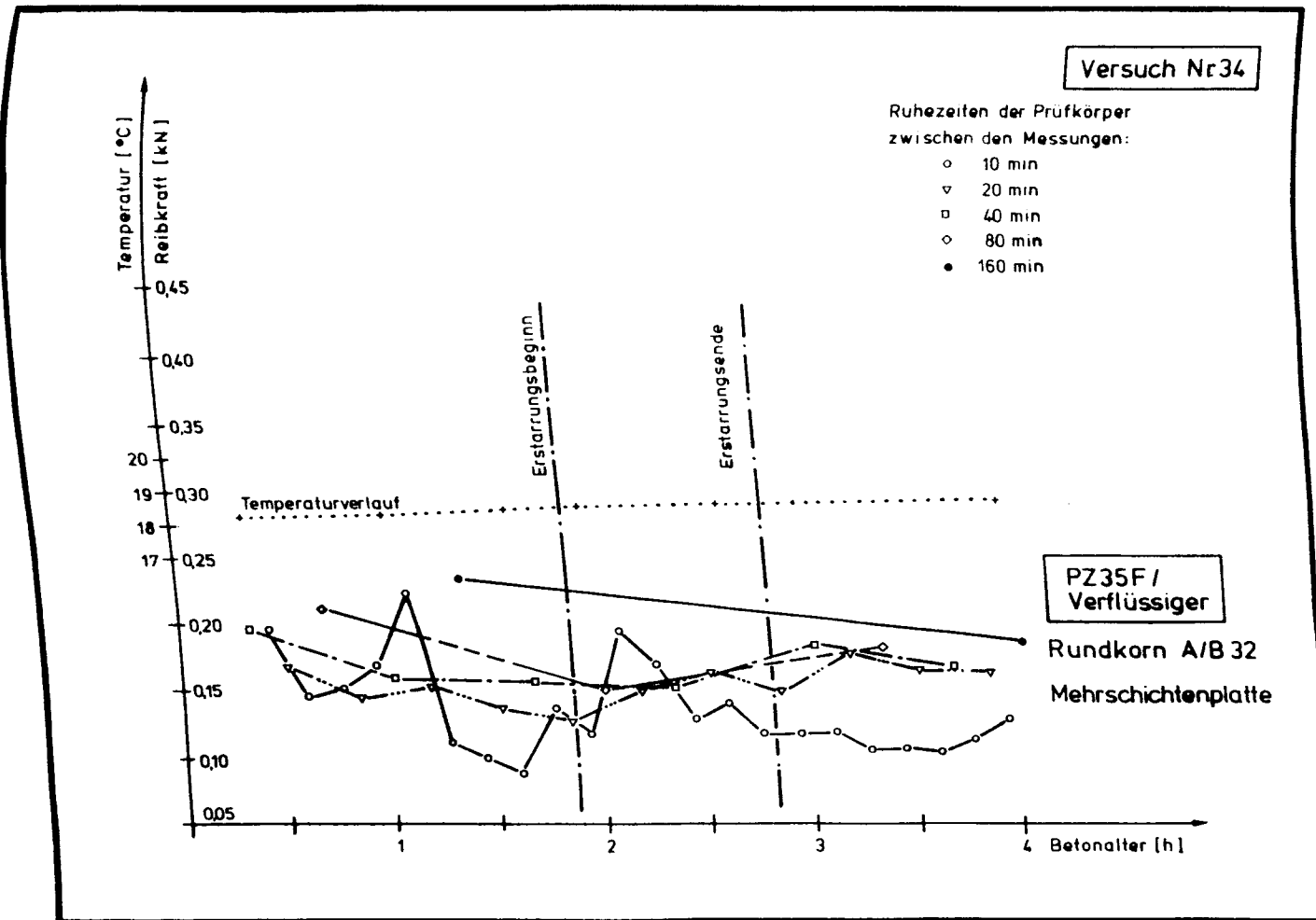


Bild 59: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 34

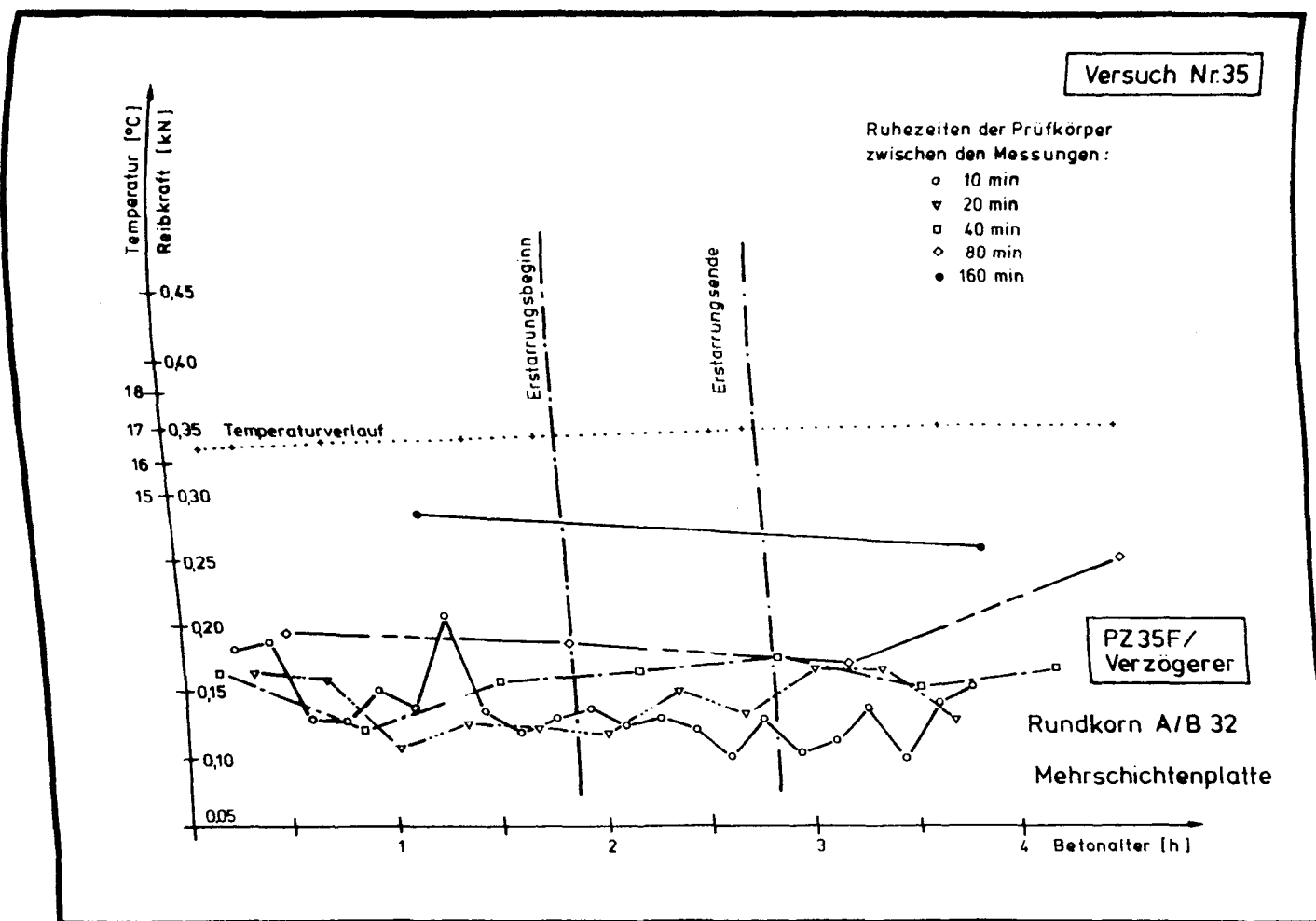


Bild 60: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 35

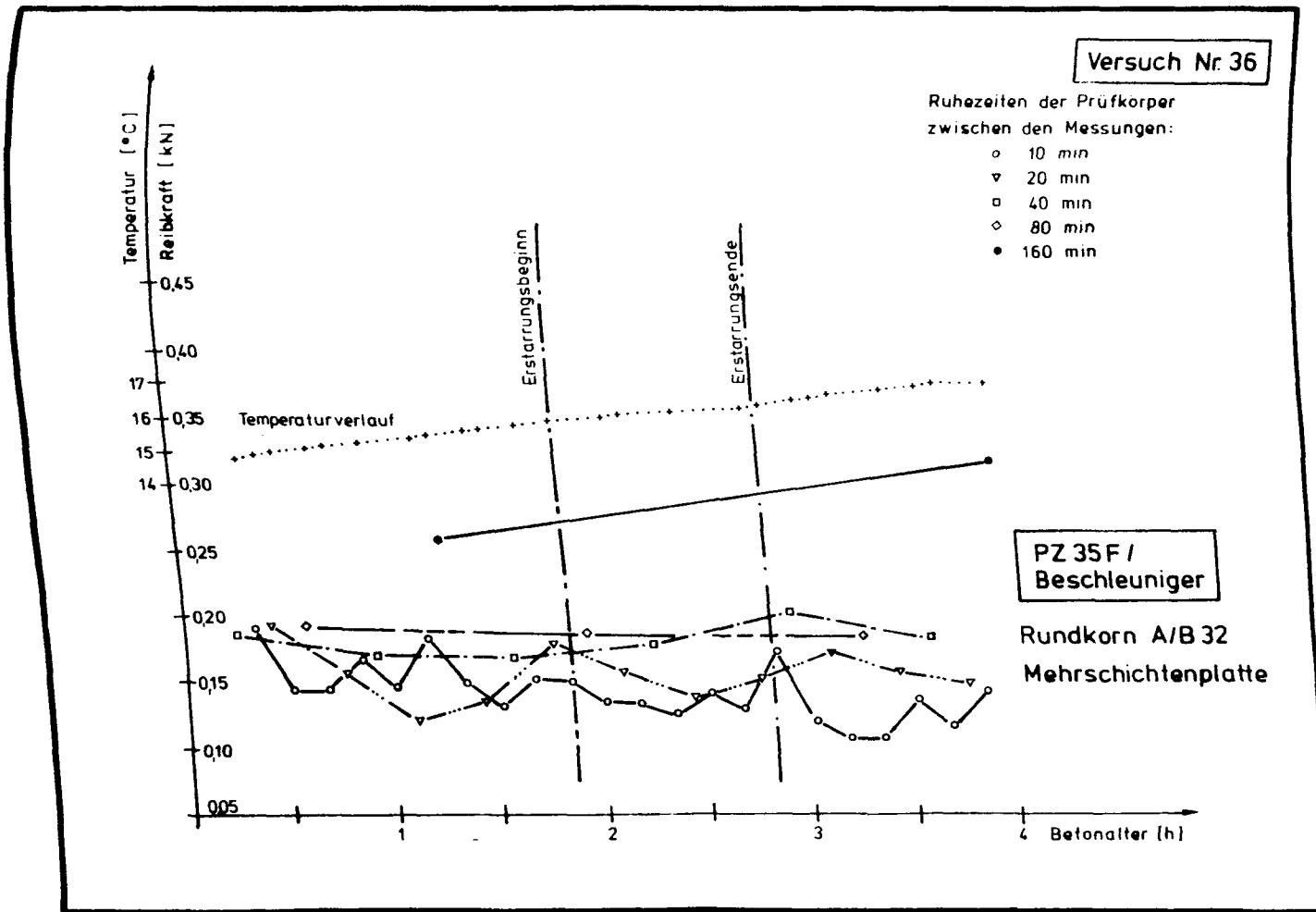


Bild 61: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 36

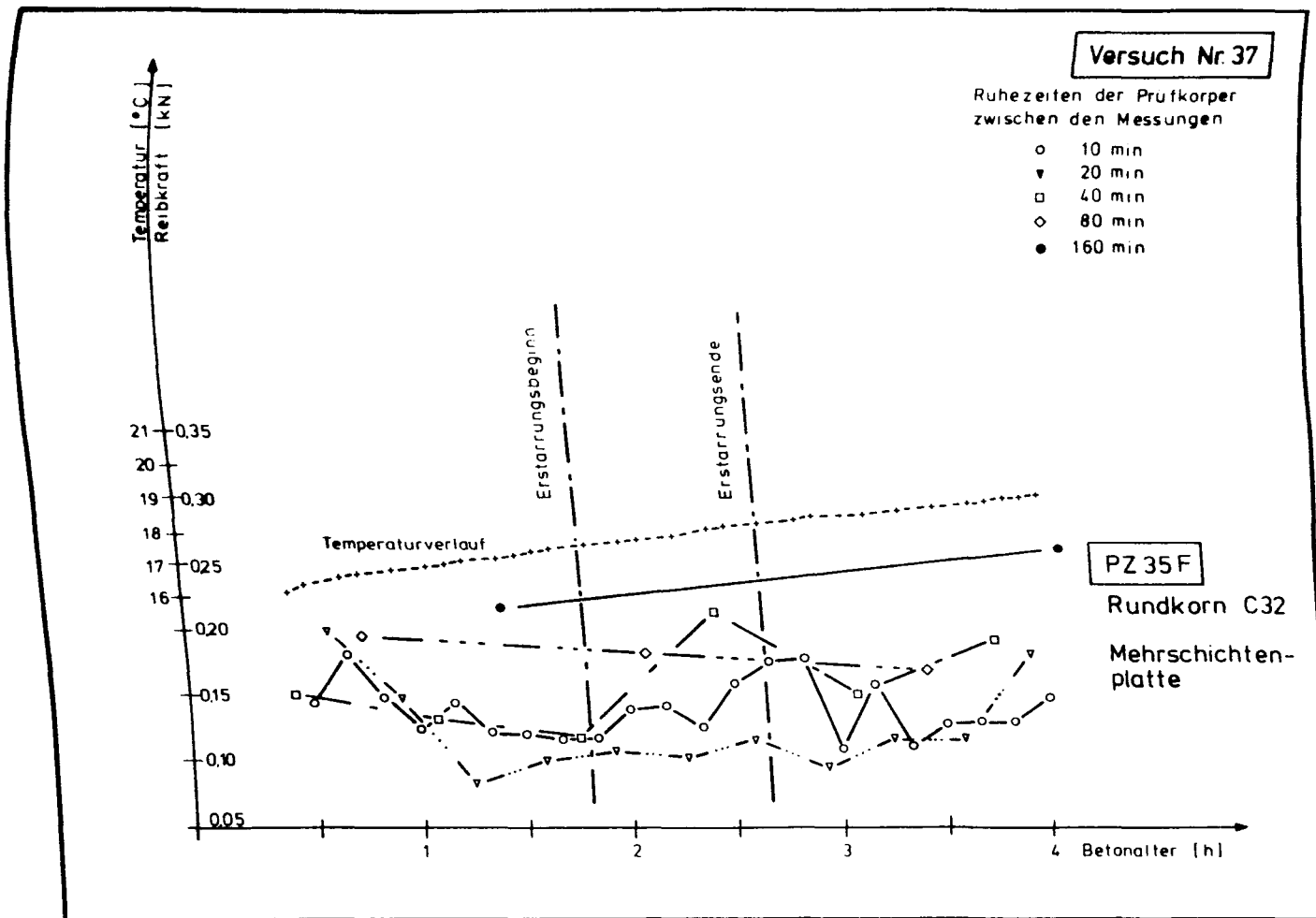


Bild 62: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 37

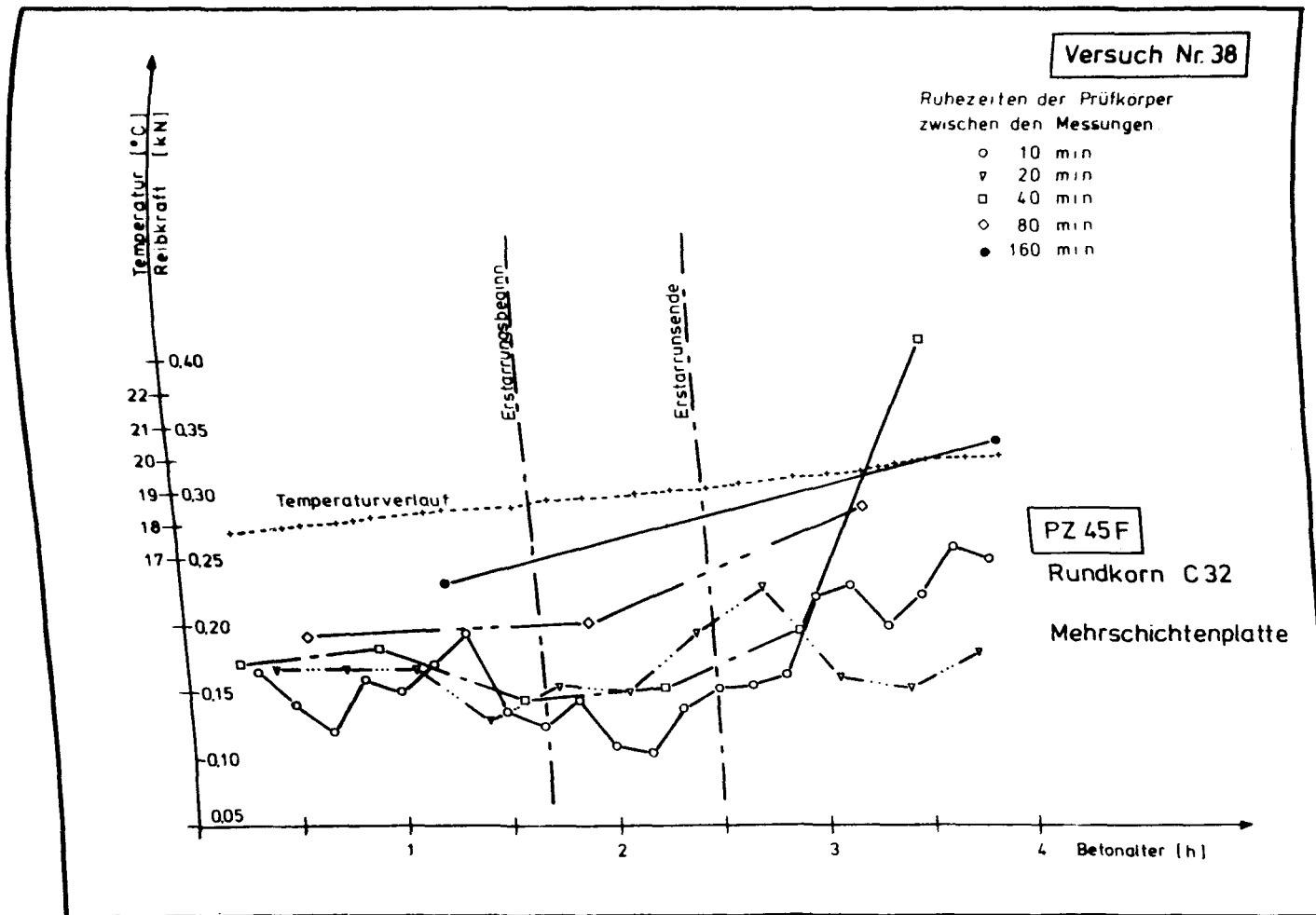


Bild 63: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 38

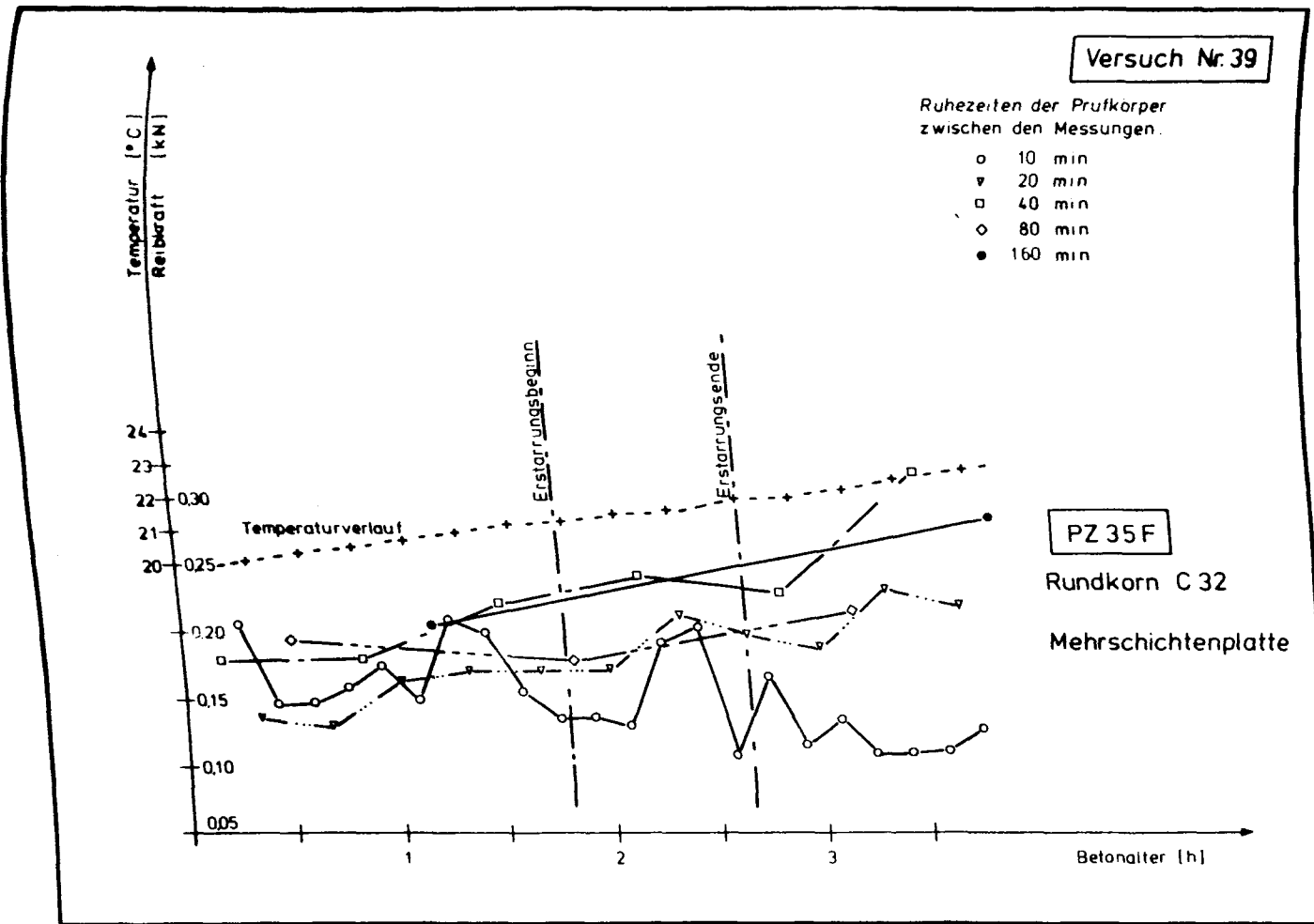


Bild 64: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 39

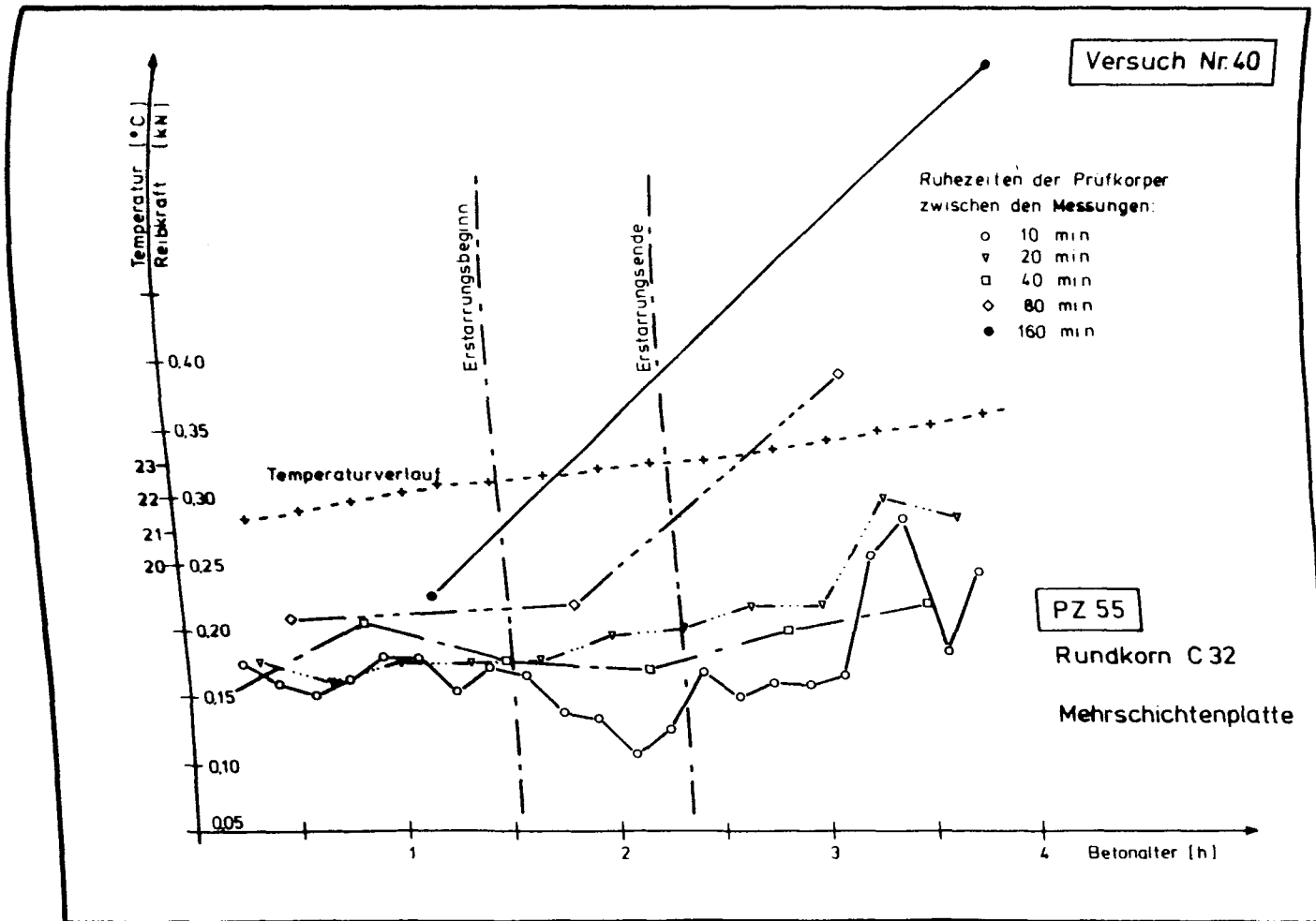


Bild 65: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 40

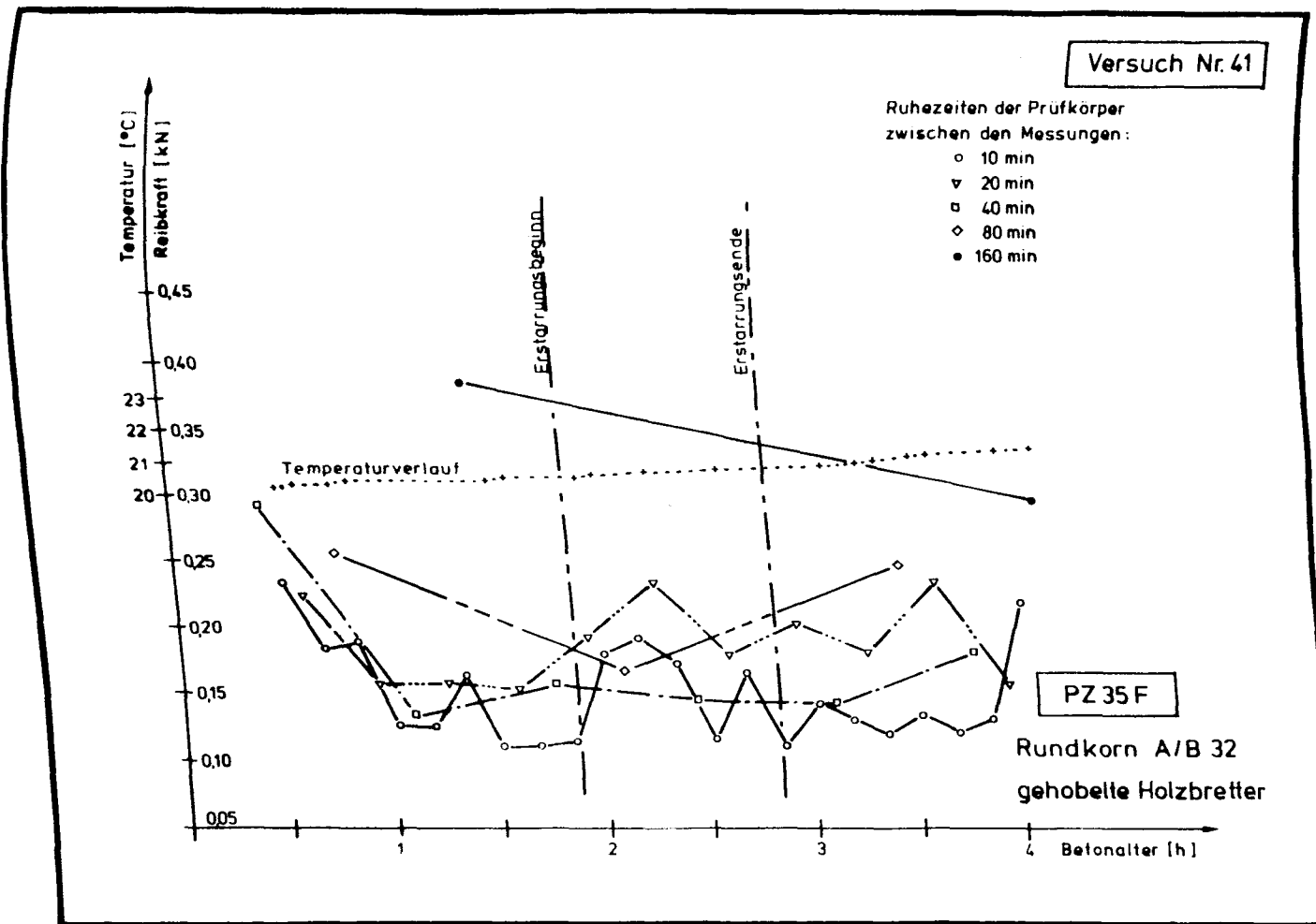


Bild 66: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 41

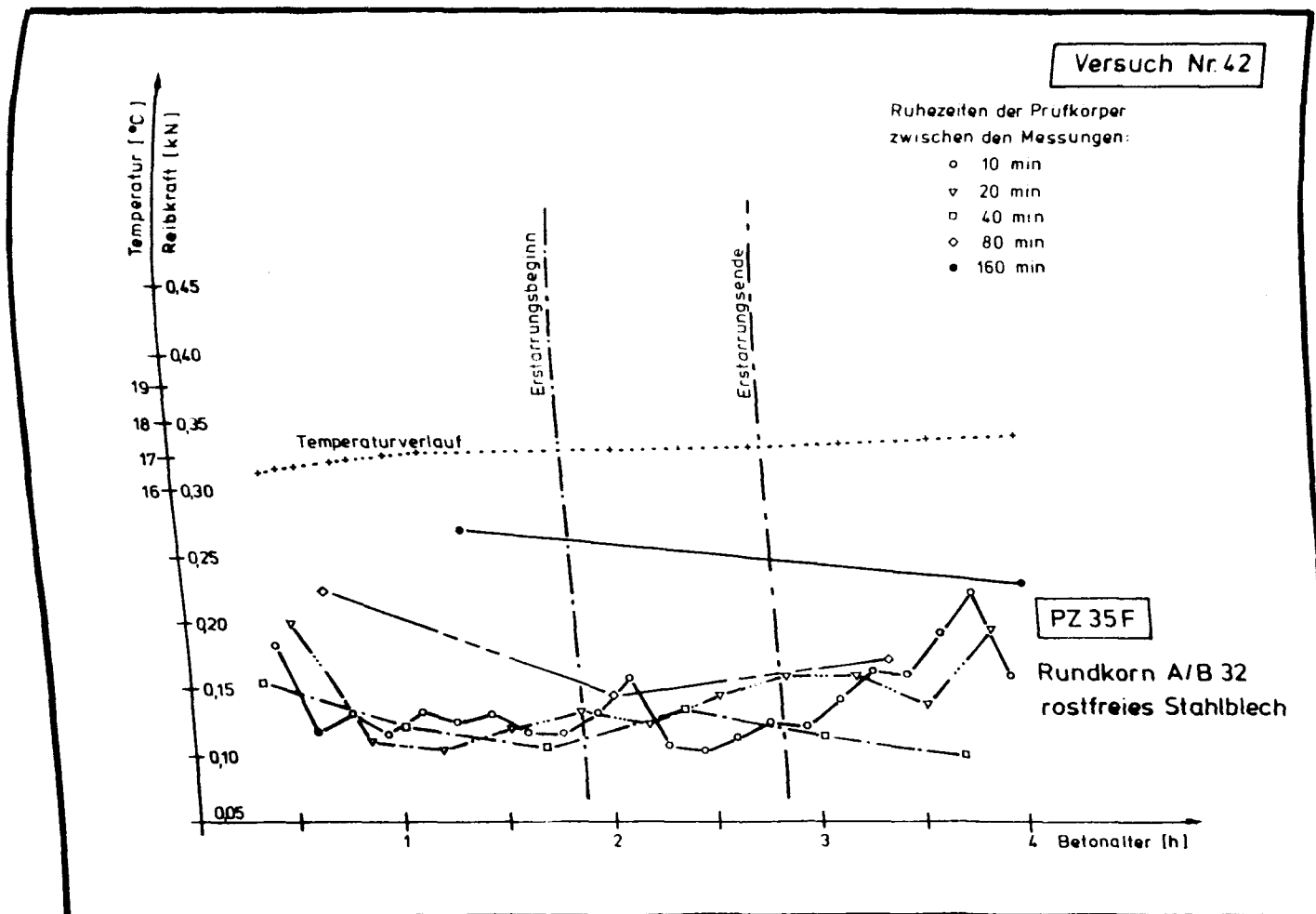


Bild 67: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 42

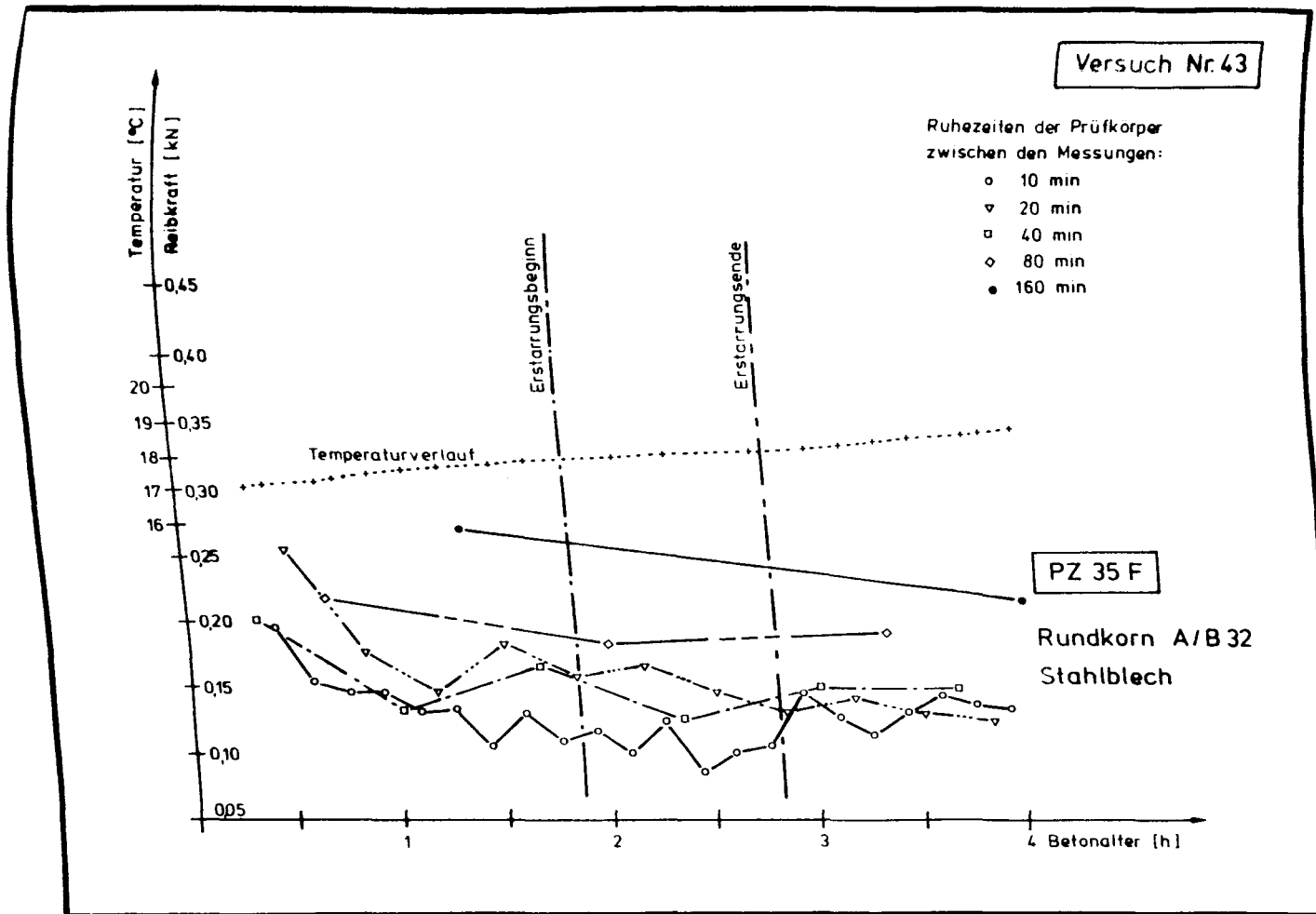


Bild 68: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 43

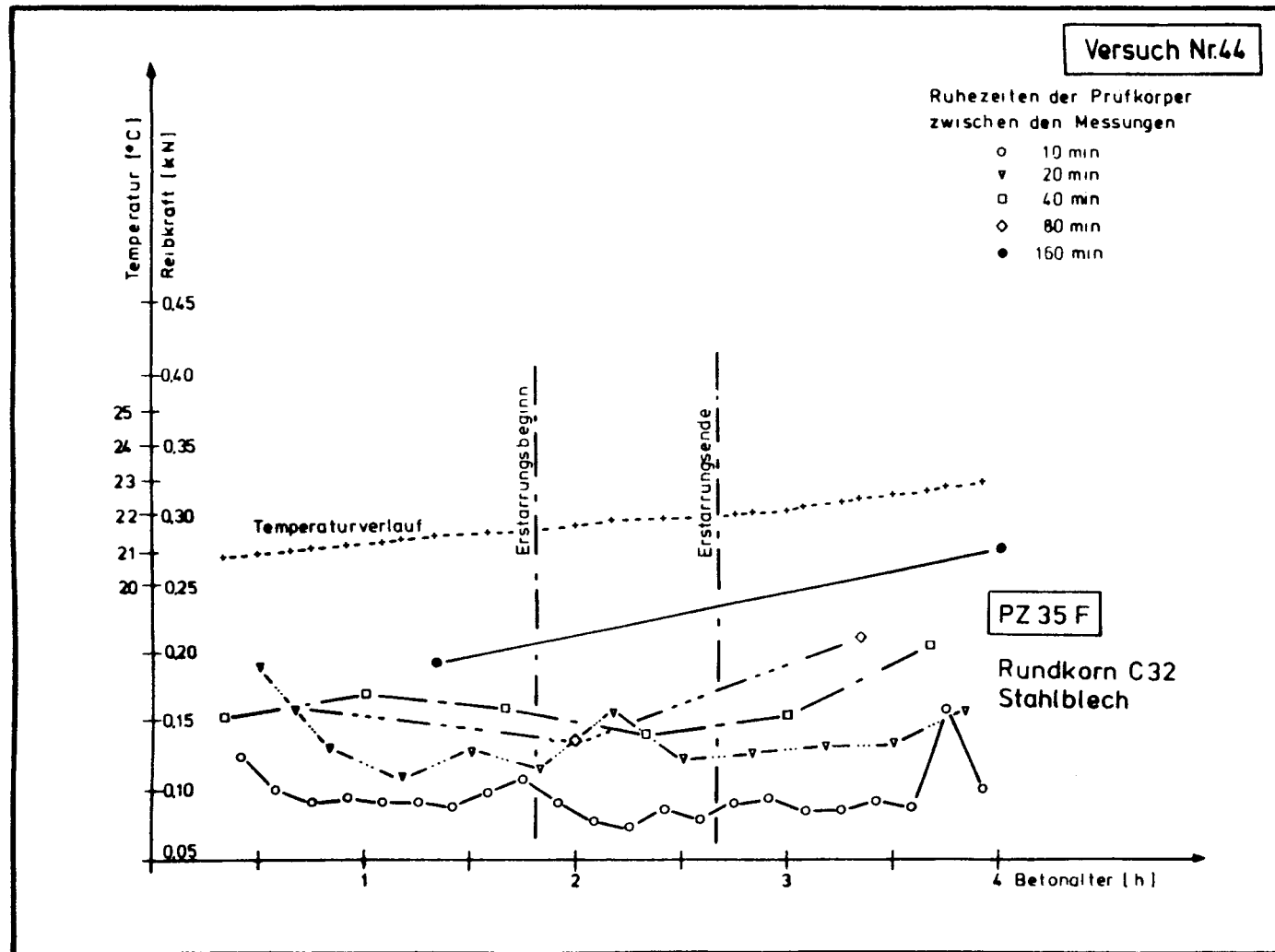


Bild 69: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 44

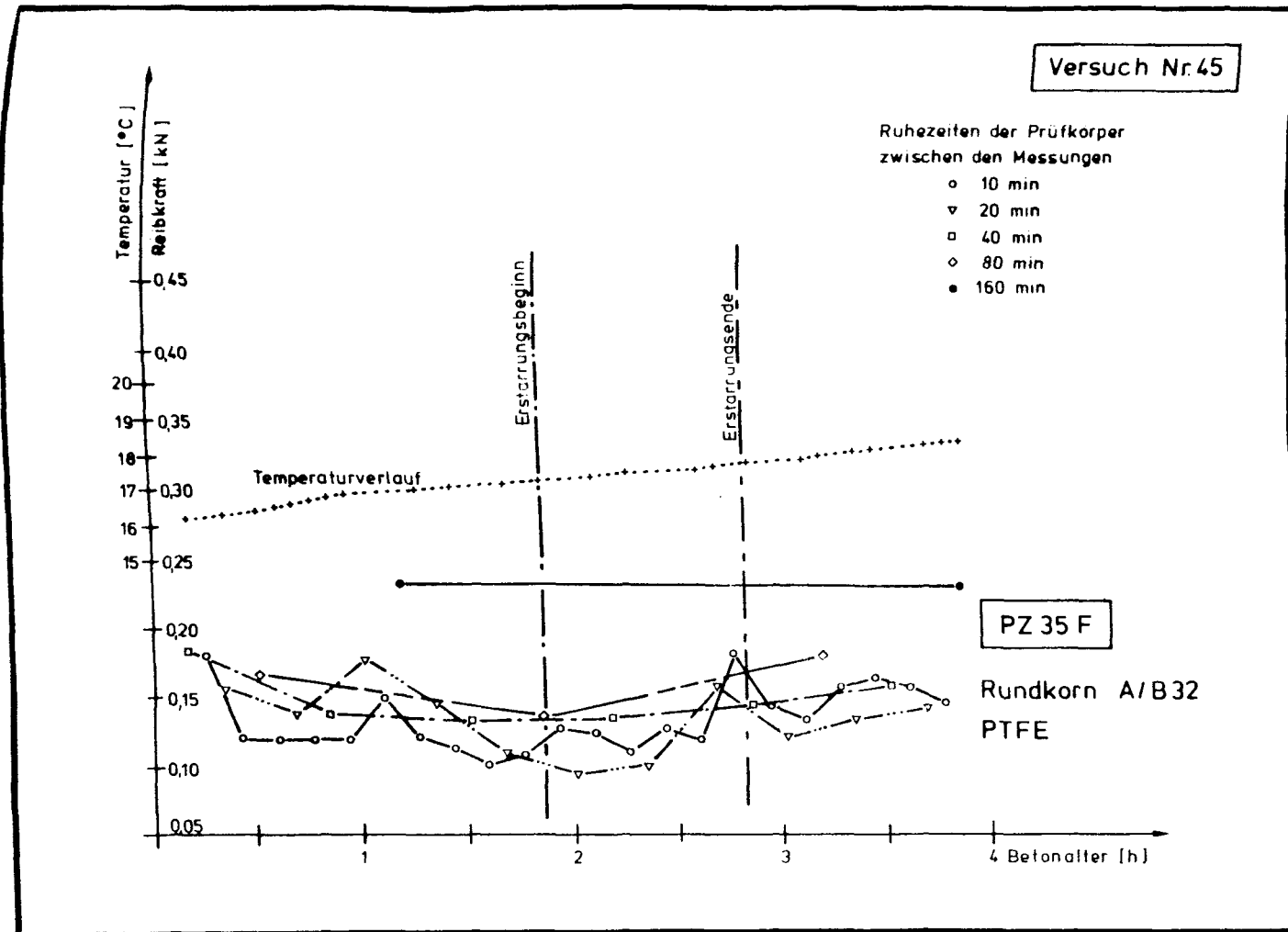


Bild 70: Versuchsergebnisse Reibungsversuche, Versuch Nr. 45

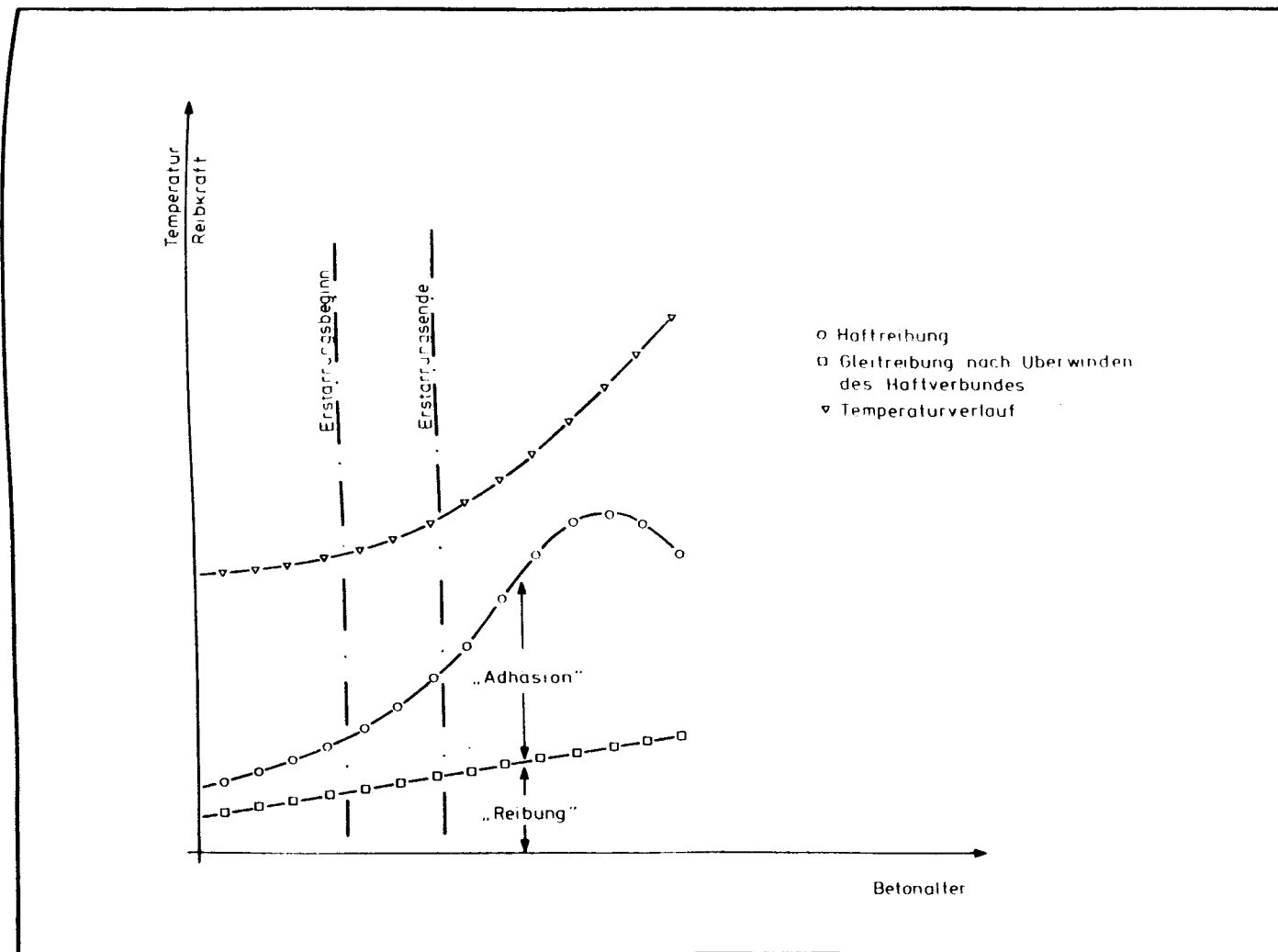


Bild 71: Prinzipieller Verlauf der Meßwerte der Reibungsversuche,
Versuche Nr. 1 bis 29

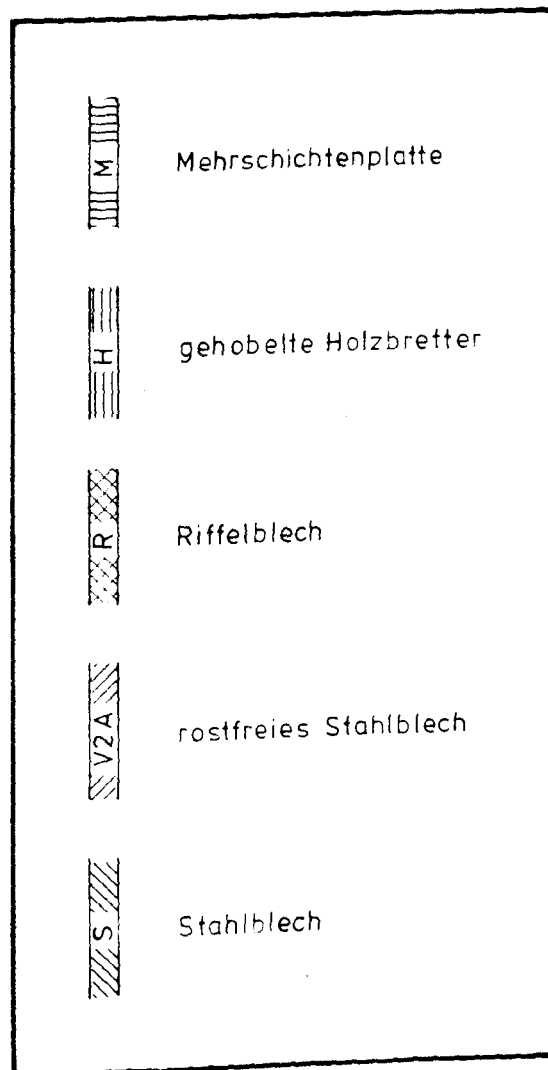


Bild 72: Symbole für die Schalungsmaterialien
(Bilder 73 bis 76, 81 bis 83,
86 bis 88)

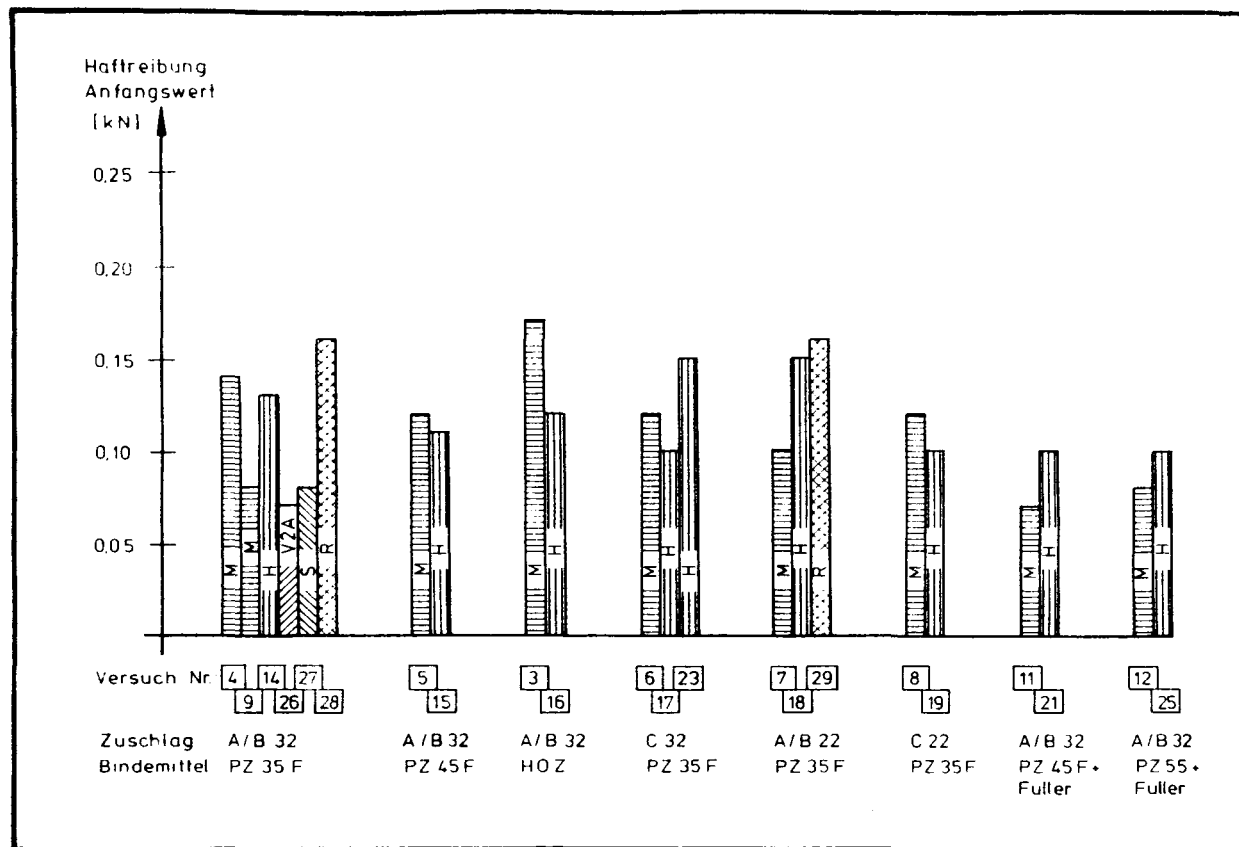


Bild 73: Einfluß des Schalungsmaterials auf die Anfangswerte
der gemessenen Haftreibung

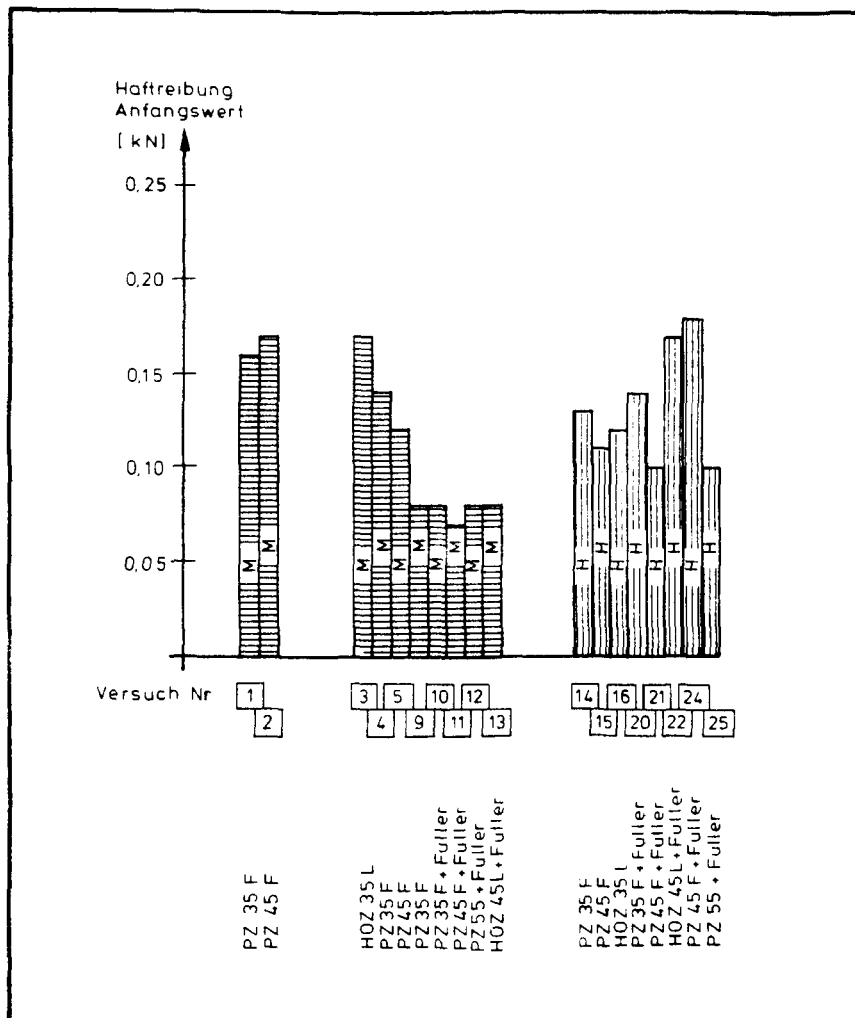


Bild 74: Einfluß des Bindemittels auf
die Anfangswerte der
gemessenen Haftreibung

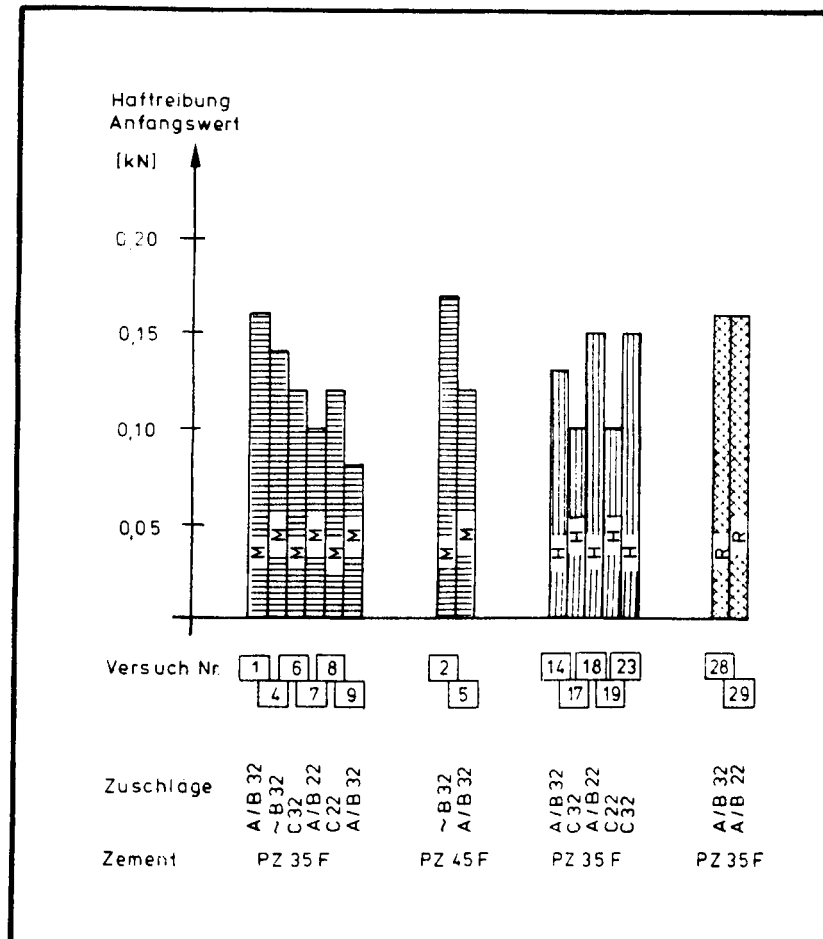


Bild 75: Einfluß der Zuschläge des Betons auf die Anfangswerte der gemessenen Haftreibung

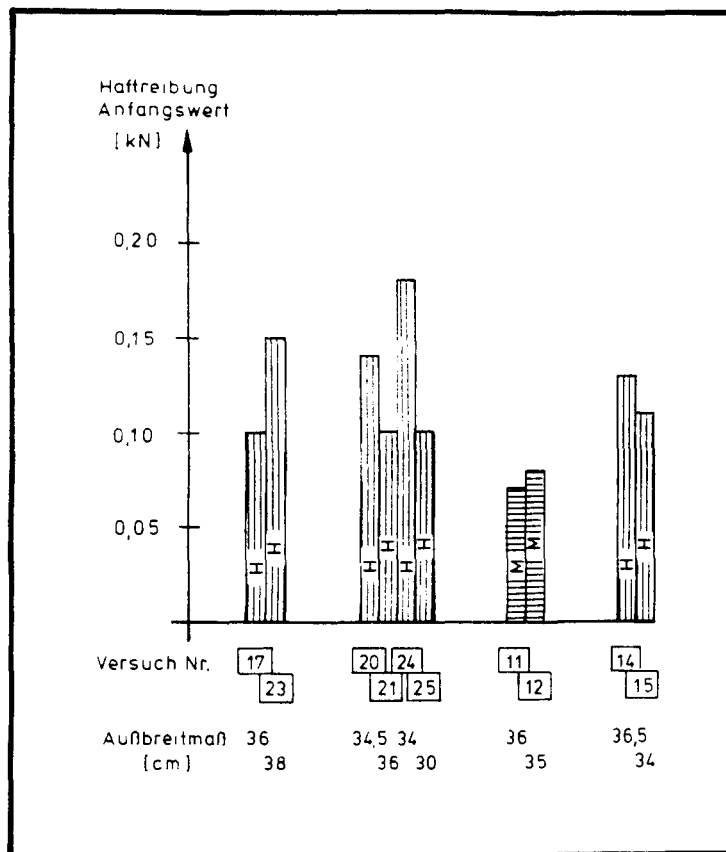


Bild 76: Einfluß des Ausbreitmaßes des Betons
auf die Anfangswerte
der gemessenen Haftreibung

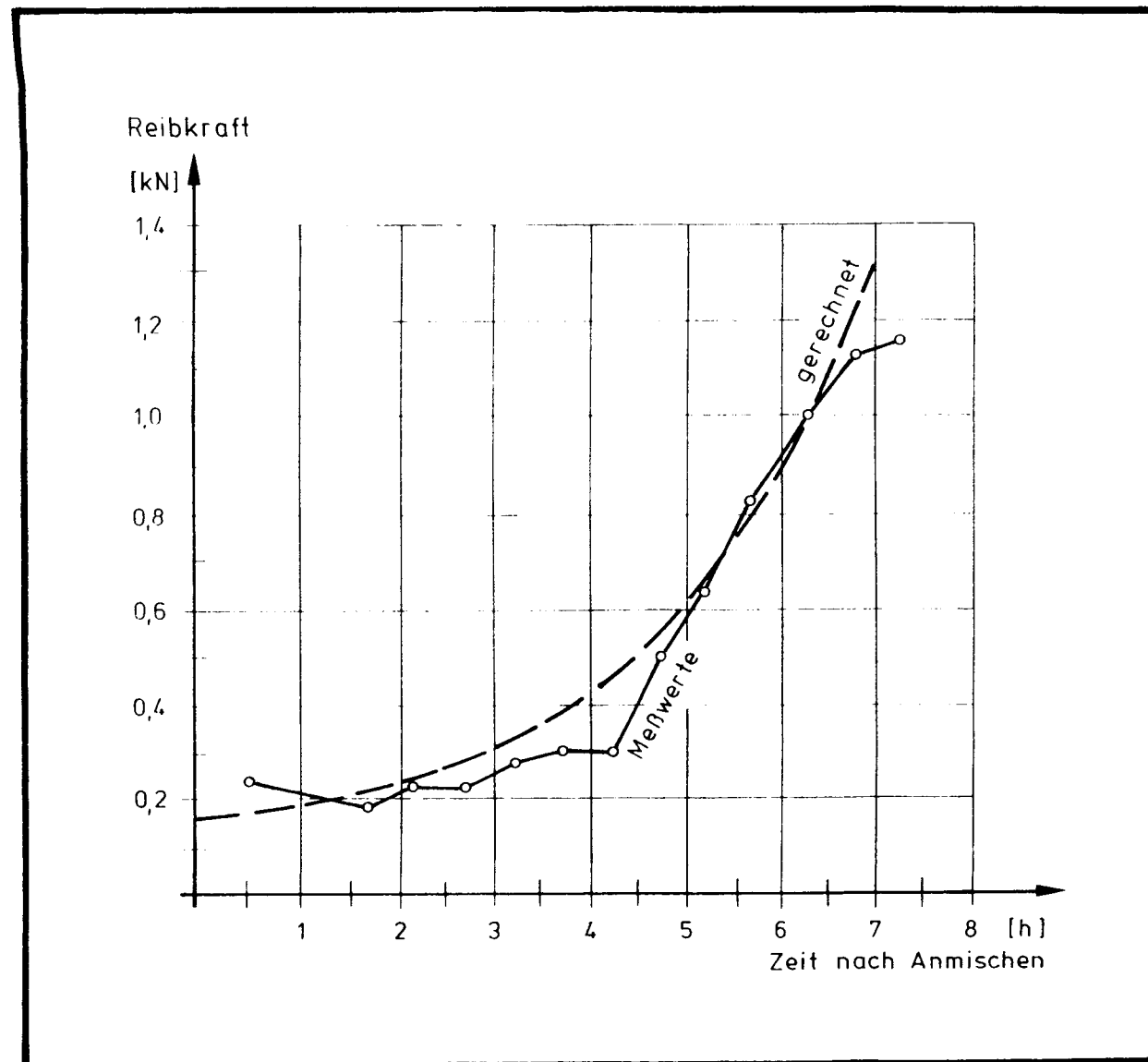


Bild 77: Vergleich der Meßwerte mit gerechnetem Verlauf
der zeitabhängigen Werte der Haftreibung (hier Versuch Nr. 1)

Versuch Nr.	Kurvenparameter		
	A	B	C
1	0,0206	0,2952	0,16
2	0,0124	0,5440	0,17
3	0,0310	0,1811	0,20
4	0,0224	0,3960	0,16
5	0,0170	0,6316	0,13
6	0,02162	0,3723	0,13
7	0,0669	0,2502	0,12
8	0,0122	0,4711	0,18
9	0,0484	0,2191	0,10
10	0,0222	0,3121	0,12
11	0,0243	0,3043	0,15
12	0,0360	0,4582	0,15
13	0,0480	0,1062	0,13
14	0,0900	0,1752	0,15
15	0,0476	0,3426	0,25
16	0,1197	0,0359	0,20
17	0,1038	0,0546	0,12
18	0,0420	0,2007	0,27
19	0,0386	0,1820	0,20
20	0,1206	0,0652	0,16
21	0,0643	0,1951	0,13
22	0,0798	0,0400	0,24
23	0,0441	0,0417	0,18
24	0,0771	0,1199	0,18
25	0,0612	0,1962	0,30
26	0,0030	0,7230	0,10
27	0,0102	0,5866	0,12
28	0,0204	0,3600	0,42
29	0,0561	0,1209	0,35

Tabelle 12: Kurvenparameter A, B und C,
aus den Versuchswerten ermittelt

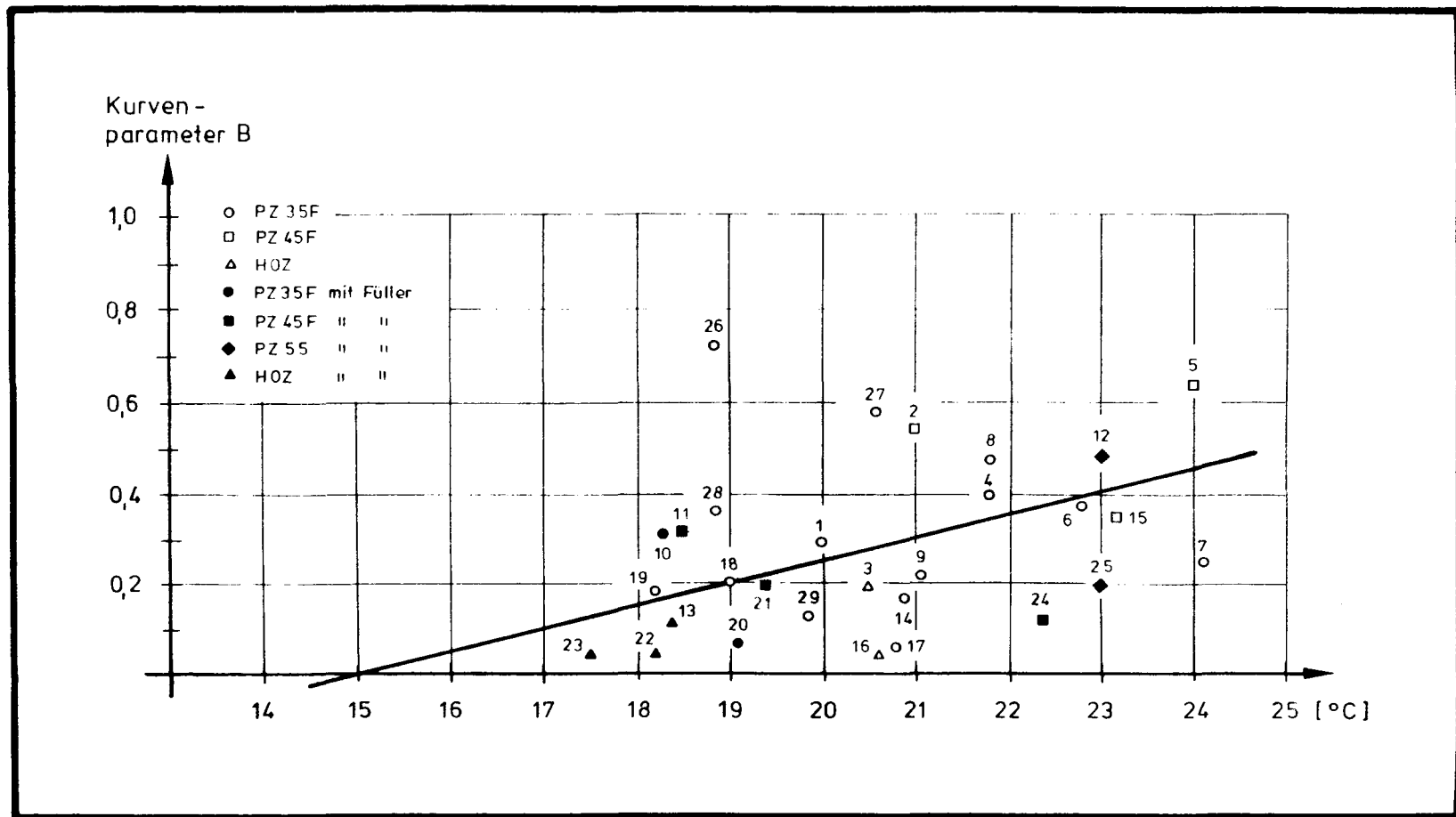


Bild 78: Einfluß der Temperatur des Betons auf den Kurvenparameter B

Versuch Nr.	Kurvenparameter		
	A	B	C
1	0,0206	0,2952	0,16
2	0,00954	0,418	0,17
3	0,0243	0,142	0,20
4	0,0167	0,2955	0,16
5	0,0117	0,4356	0,13
6	0,0156	0,2678	0,13
7	0,04598	0,1720	0,12
8	0,0091	0,3516	0,18
9	0,0371	0,1679	0,10
10	0,01906	0,2679	0,12
11	0,0207	0,2590	0,15
12	0,0257	0,3273	0,15
13	0,04102	0,0908	0,13
14	0,0695	0,1353	0,15
15	0,03376	0,2430	0,25
16	0,0935	0,0280	0,20
17	0,0805	0,0423	0,12
18	0,035	0,1673	0,27
19	0,0333	0,1569	0,20
20	0,1001	0,05411	0,16
21	0,0527	0,1599	0,13
22	0,0688	0,03448	0,24
23	0,0392	0,0371	0,18
24	0,0563	0,0875	0,18
25	0,0437	0,1401	0,30
26	0,00251	0,6050	0,10
27	0,00797	0,4583	0,12
28	0,0171	0,3013	0,42
29	0,0451	0,0971	0,35

Tabelle 13: Kurvenparameter A, B und C,
temperaturkompensiert

Mehrschichtenplatte		Holzbretter		rostfreies Stahlblech	
Versuch Nr.	Kurvenparameter C	Versuch Nr.	Kurvenparameter C	Versuch Nr.	Kurvenparameter C
1	0,16	14	0,15	26	0,10
2	0,17	15	0,25		
3	0,20	16	0,20	Stahlblech	
4	0,16	17	0,12	Versuch Nr.	Kurvenparameter C
5	0,13	18	0,27	27	0,12
6	0,13	19	0,20		
7	0,12	20	0,16	Riffelblech	
8	0,18	21	0,13	Versuch Nr.	Kurvenparameter C
9	0,10	22	0,24	28	0,42
10	0,12	23	0,18	29	0,35
11	0,15	24	0,18		
12	0,13	25	0,30	i.M.	0,385
13	0,15	i.M.	0,198		
i.M.	0,146				

Tabelle 14: Nach Schalungsmaterial geordnete Zusammenstellung der Kurvenparameter C

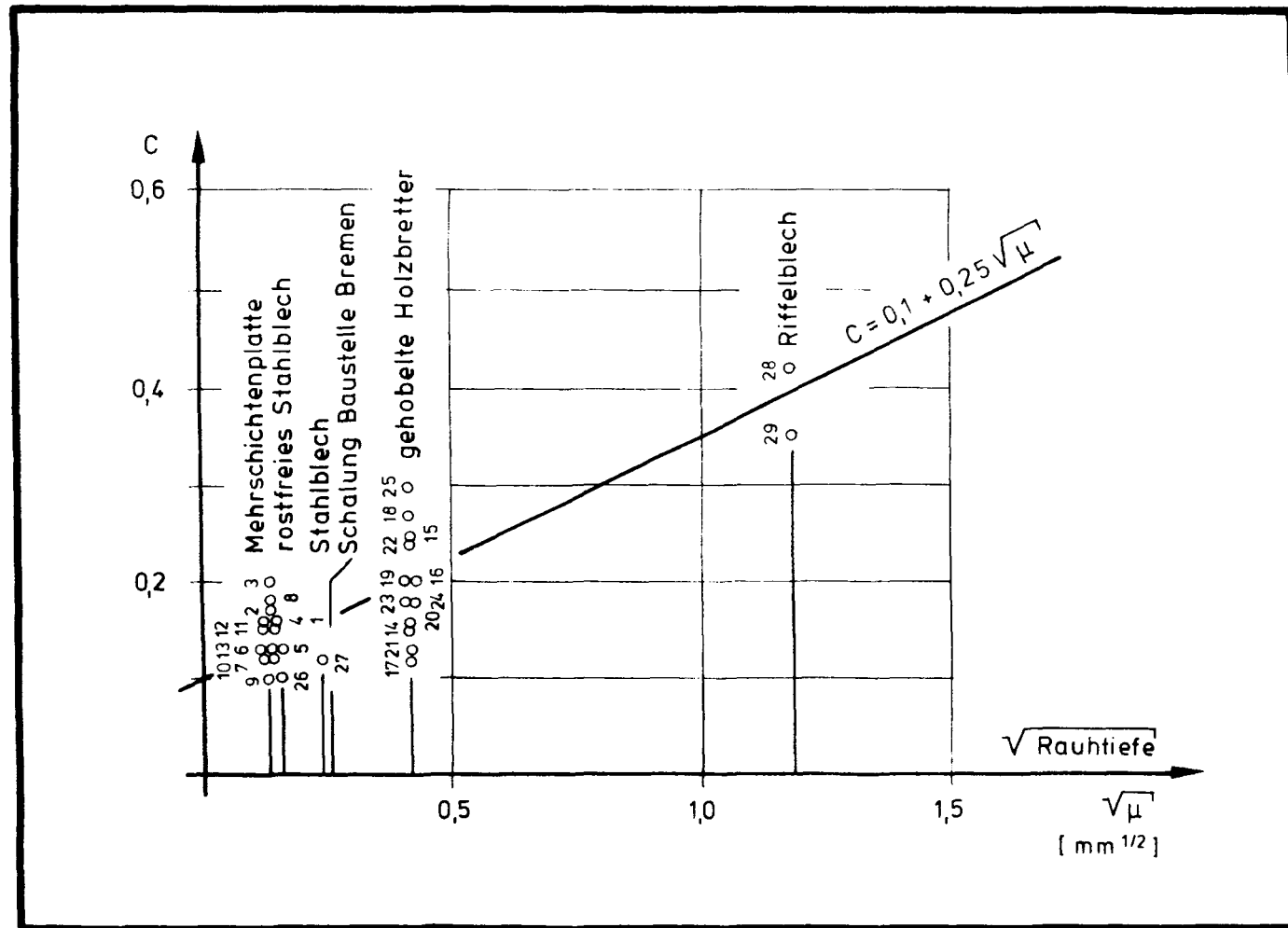


Bild 79: Einfluß der Schalungsrauhigkeit
auf die Werte des Kurvenparameters C

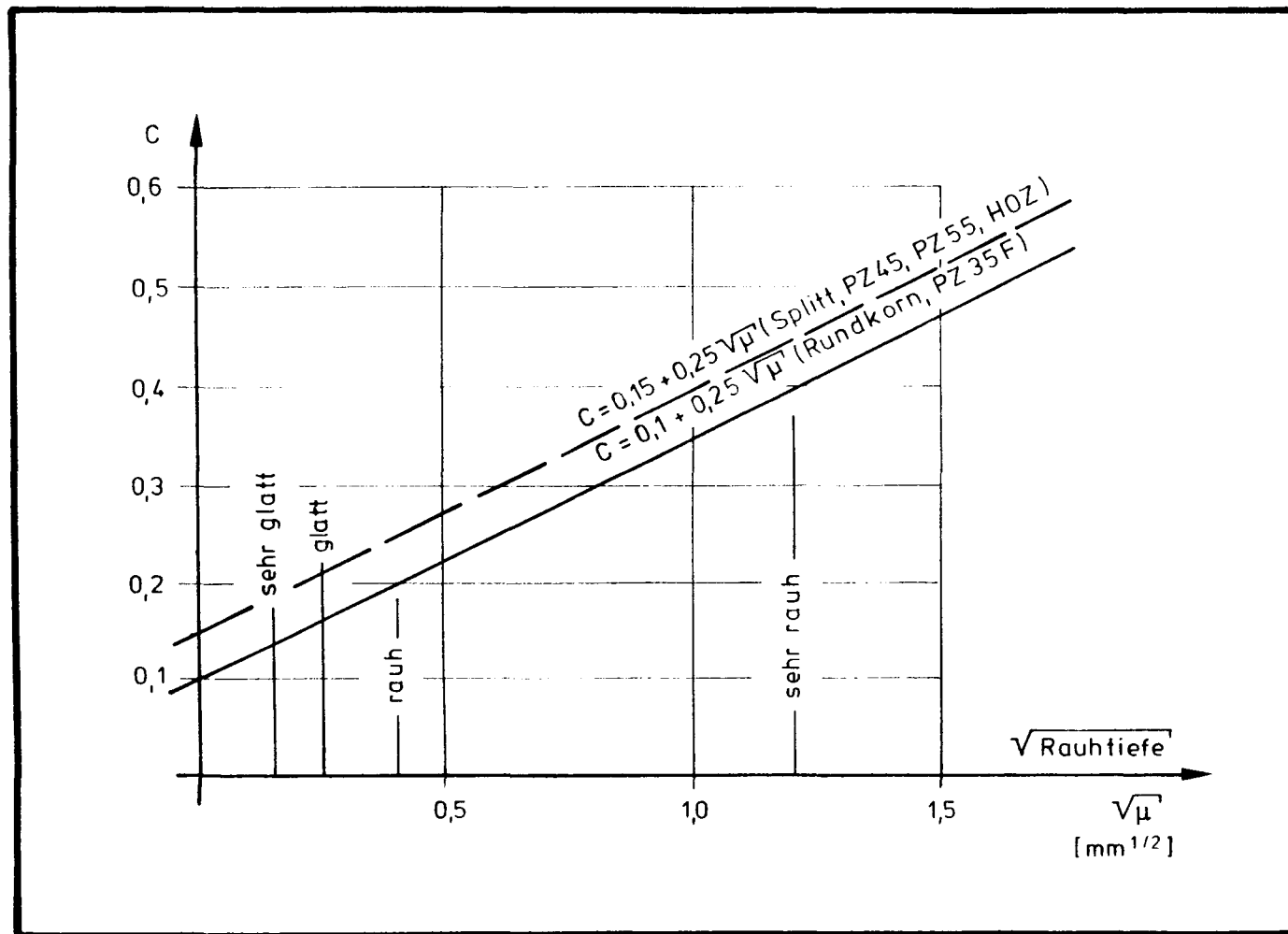


Bild 80: Einfluß der Schalungsrauigkeit
auf die Werte des Kurvenparameters C

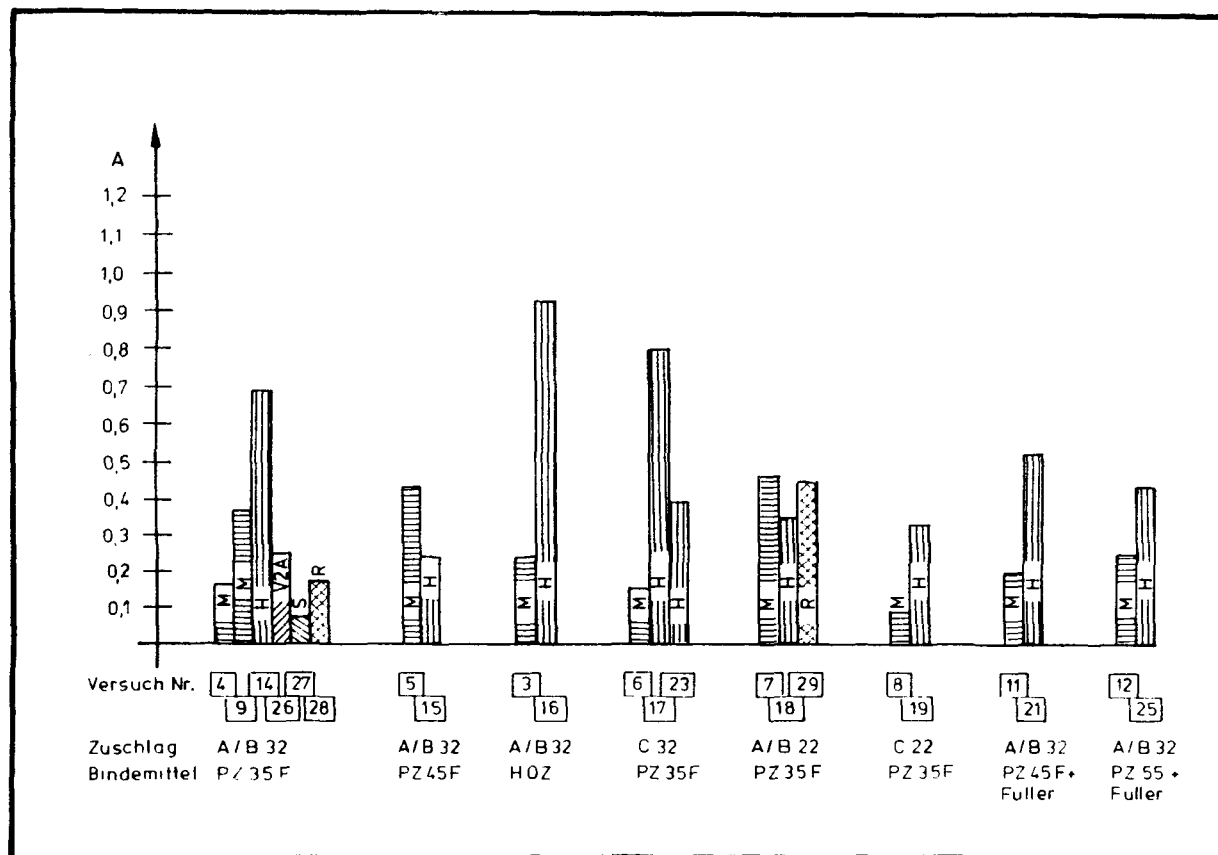


Bild 81: Einfluß des Schalungsmaterials auf den Kurvenparameter A

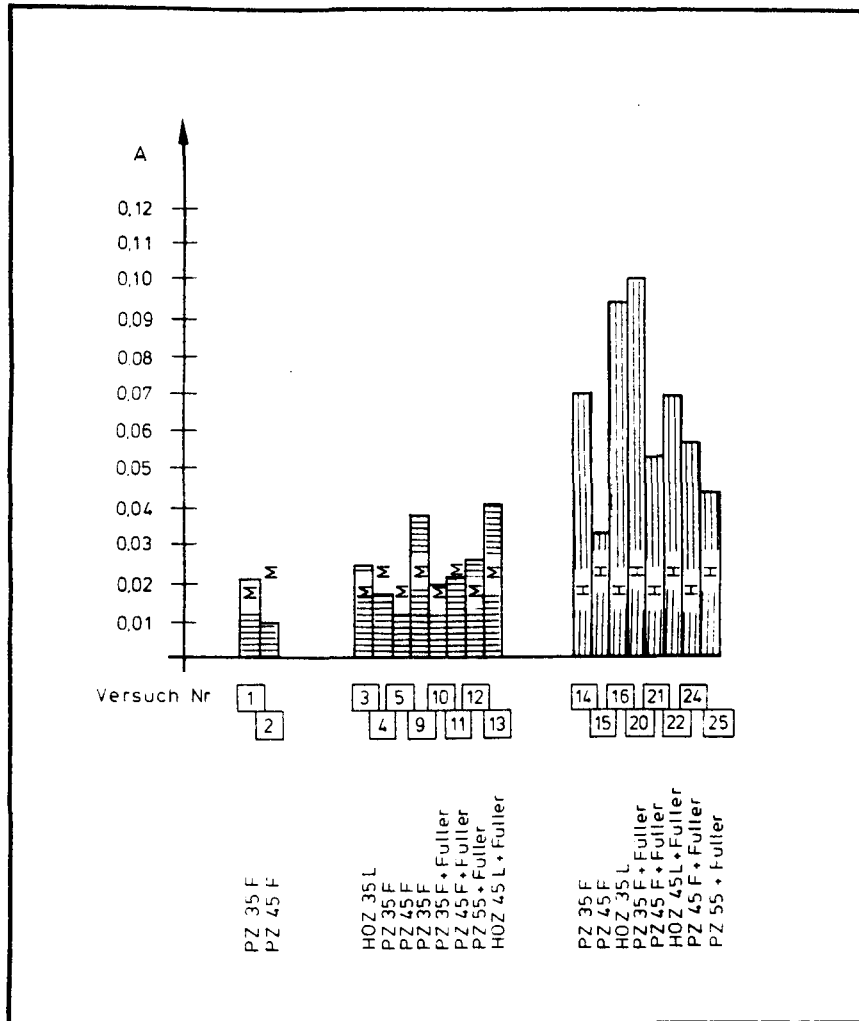


Bild 82: Einfluß des Bindemittels auf den Kurvenparameter A

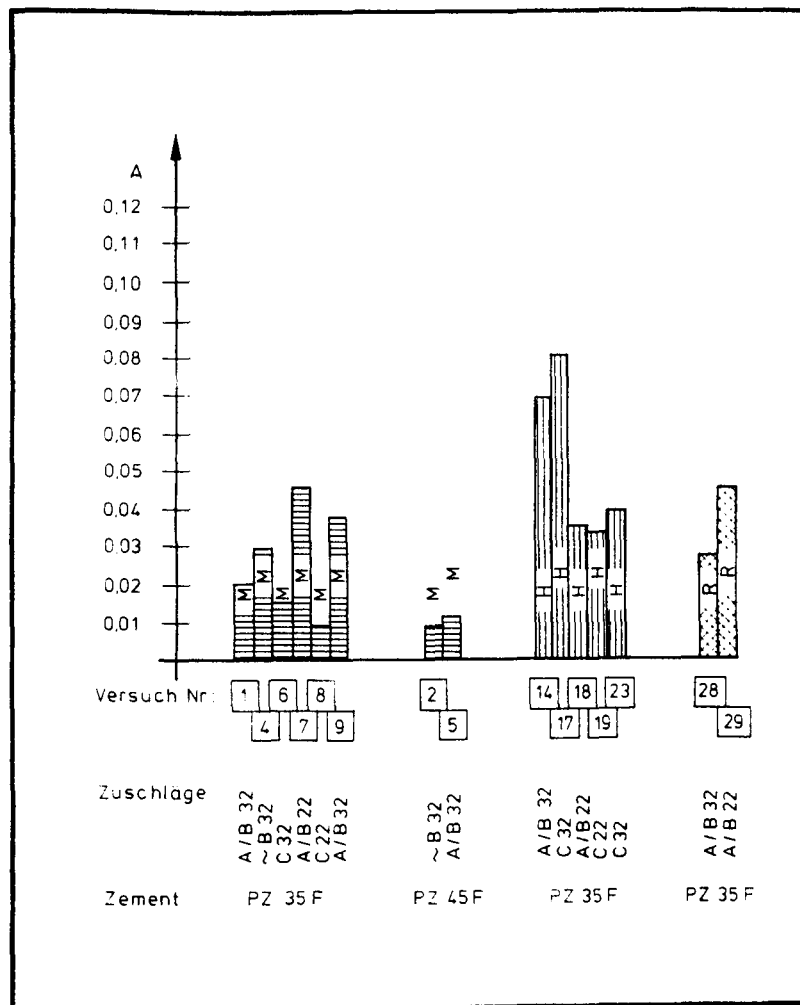


Bild 83: Einfluß der Zuschläge des Betons
auf den Kurvenparameter A

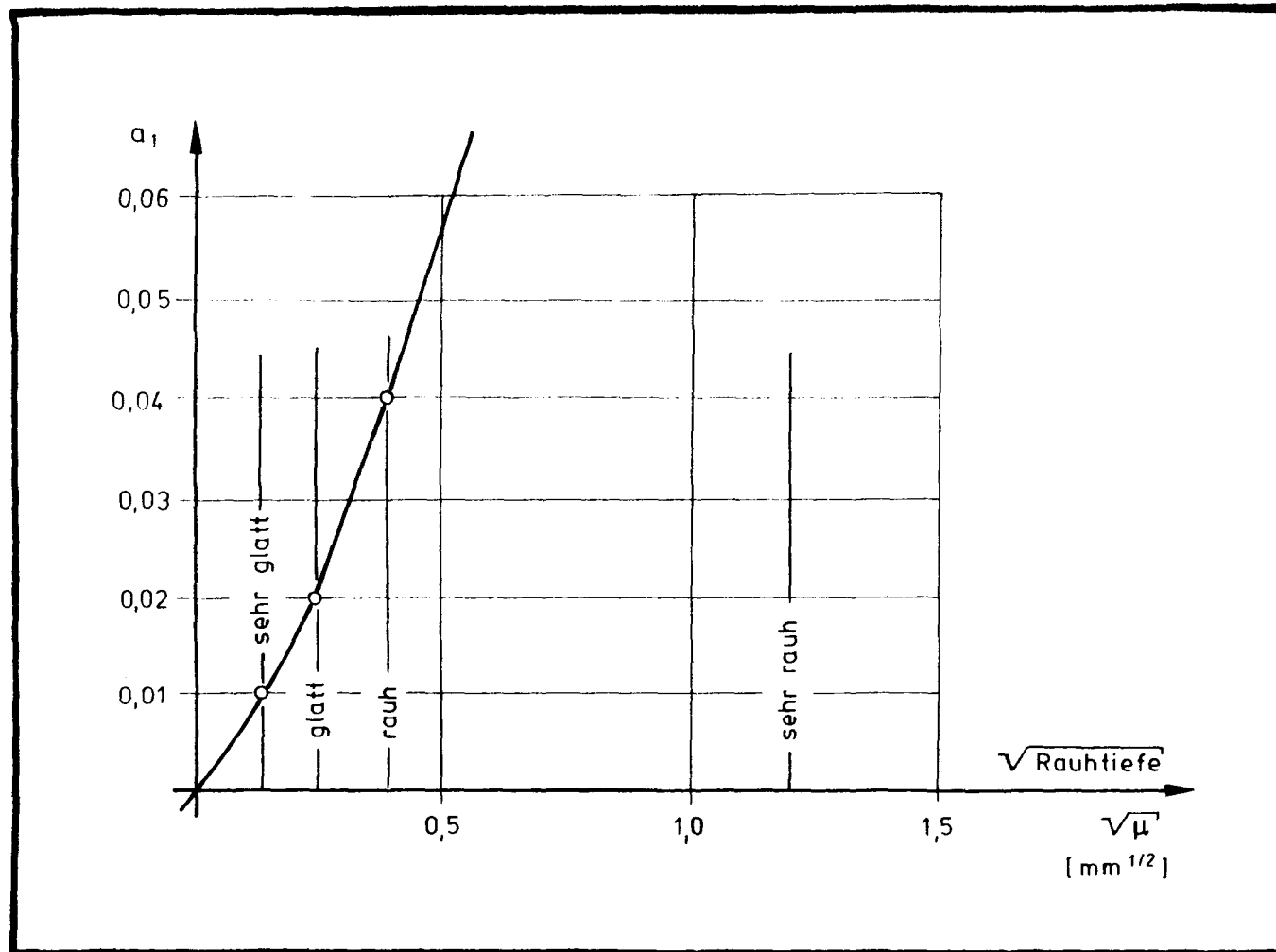


Bild 84: Einfluß der Schalungsrauhigkeit
auf die Werte des Kurvenparameters a_1

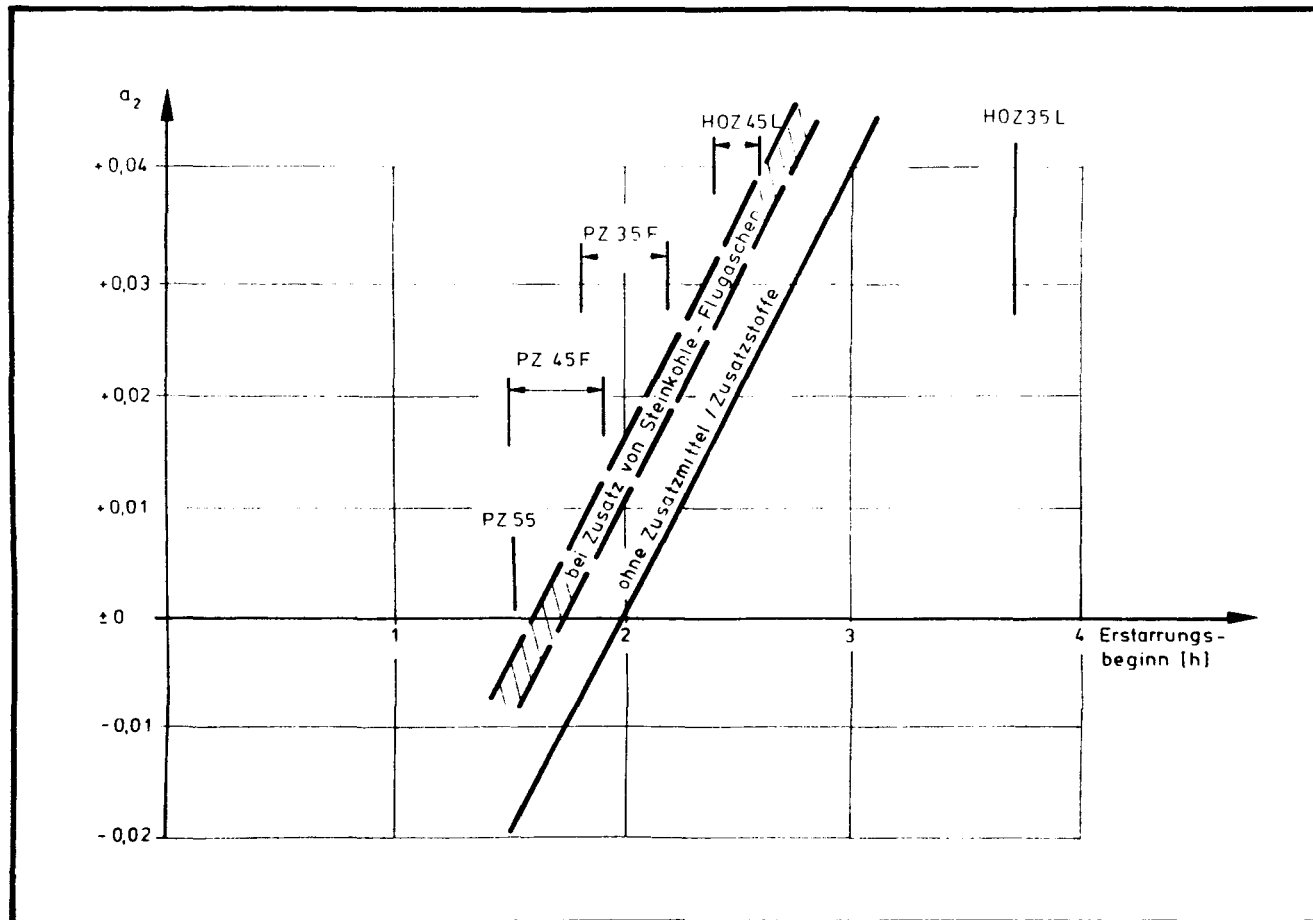


Bild 85: Einfluß des Erstarrungsbeginns der Zemente auf den Kurvenparameter a_2

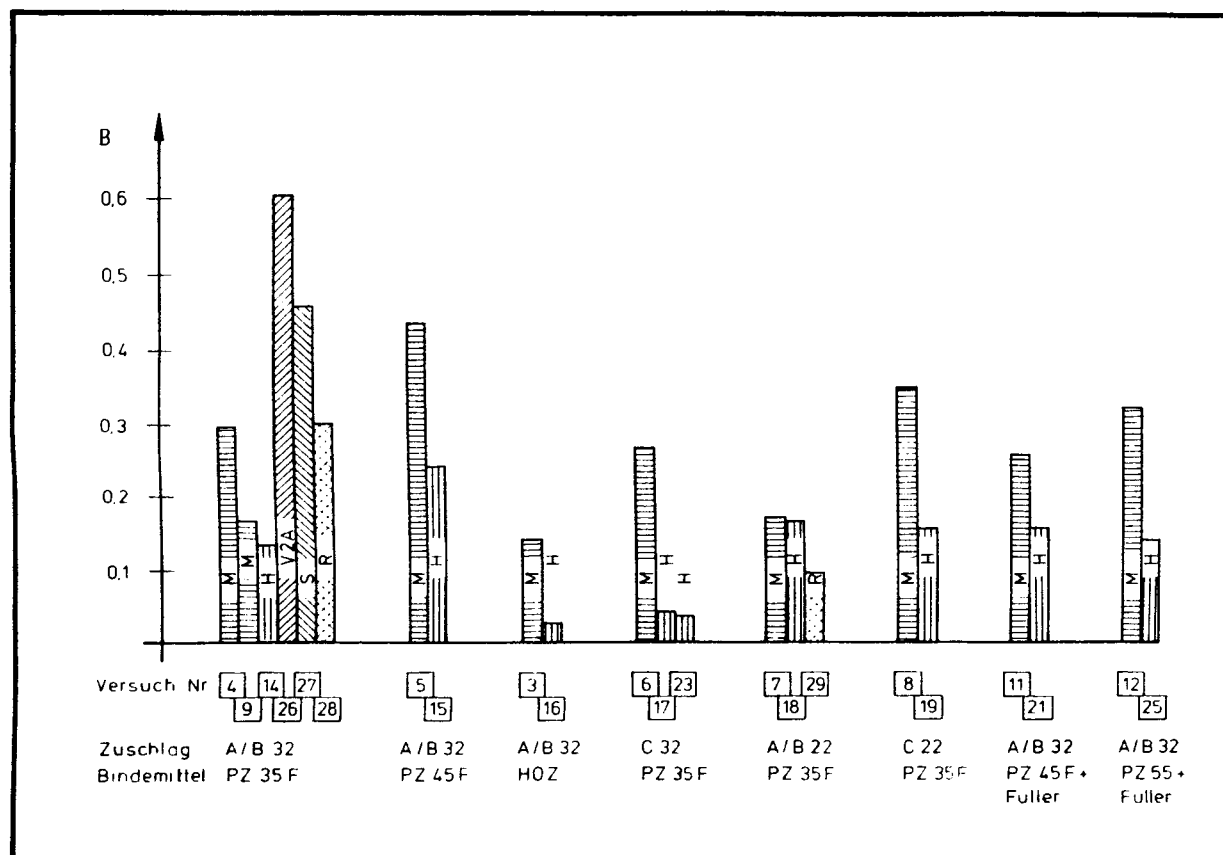


Bild 86: Einfluß des Schalungsmaterials auf den Kurvenparameter B

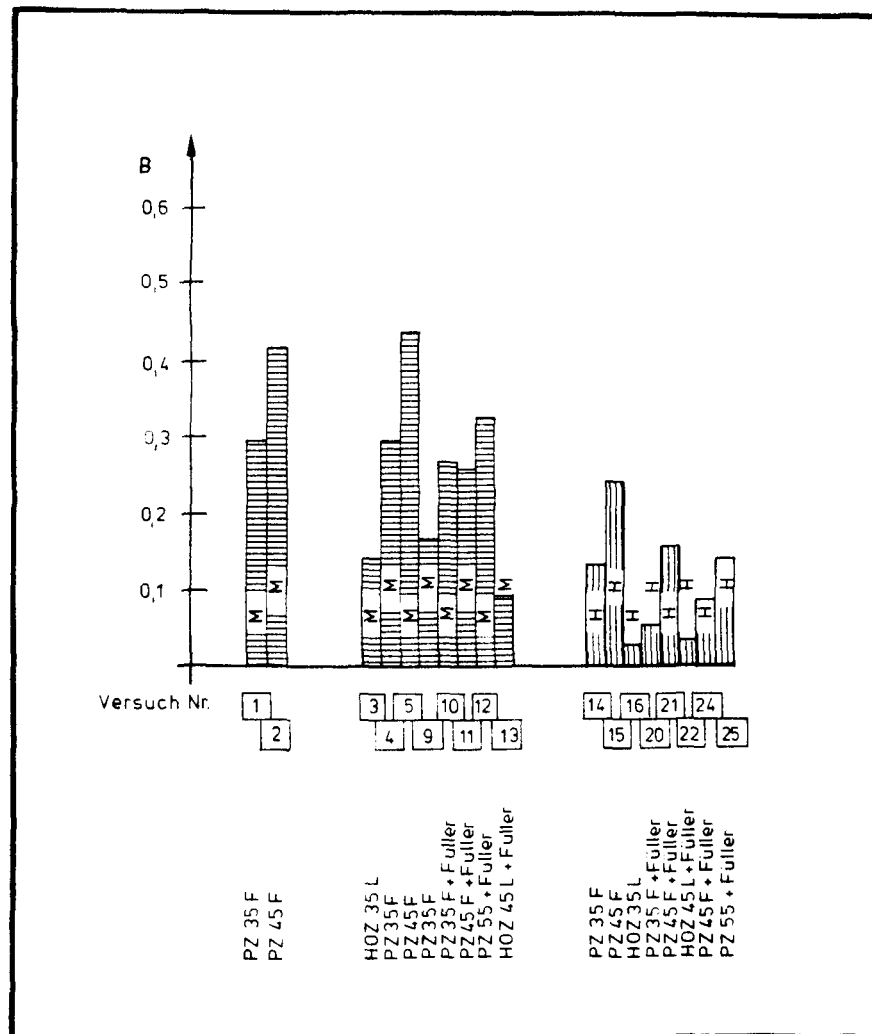


Bild 87: Einfluß des Bindemittels auf den Kurvenparameter B

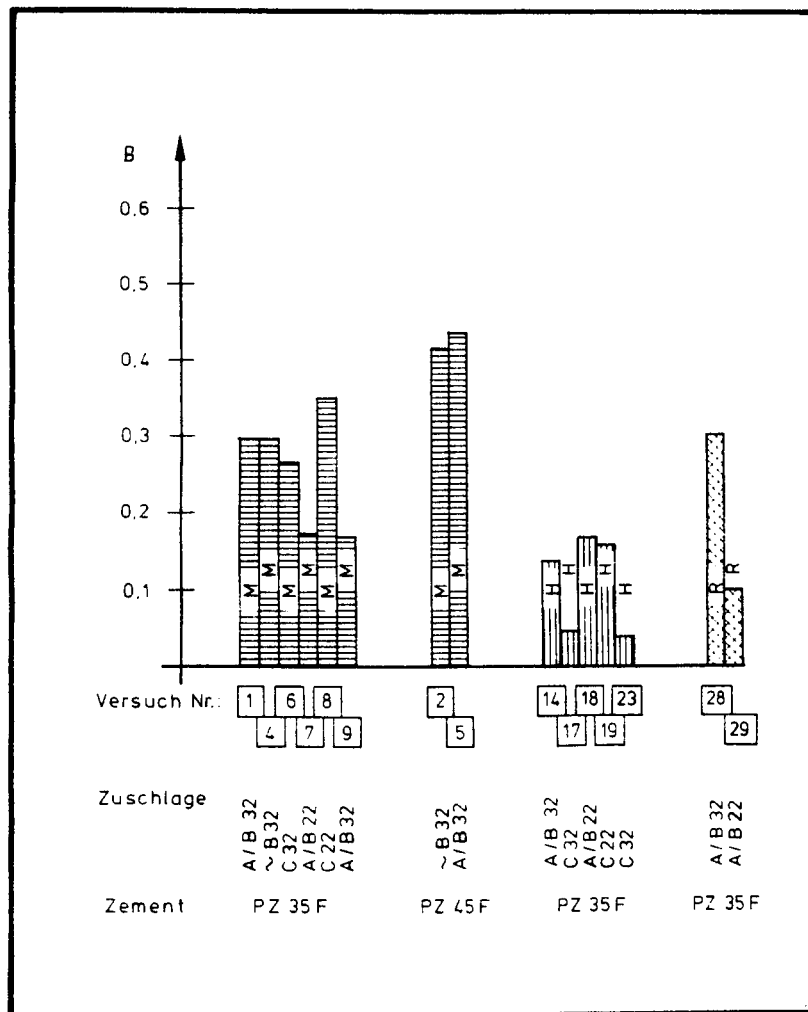


Bild 88: Einfluß der Zuschläge des Betons
auf den Kurvenparameter B

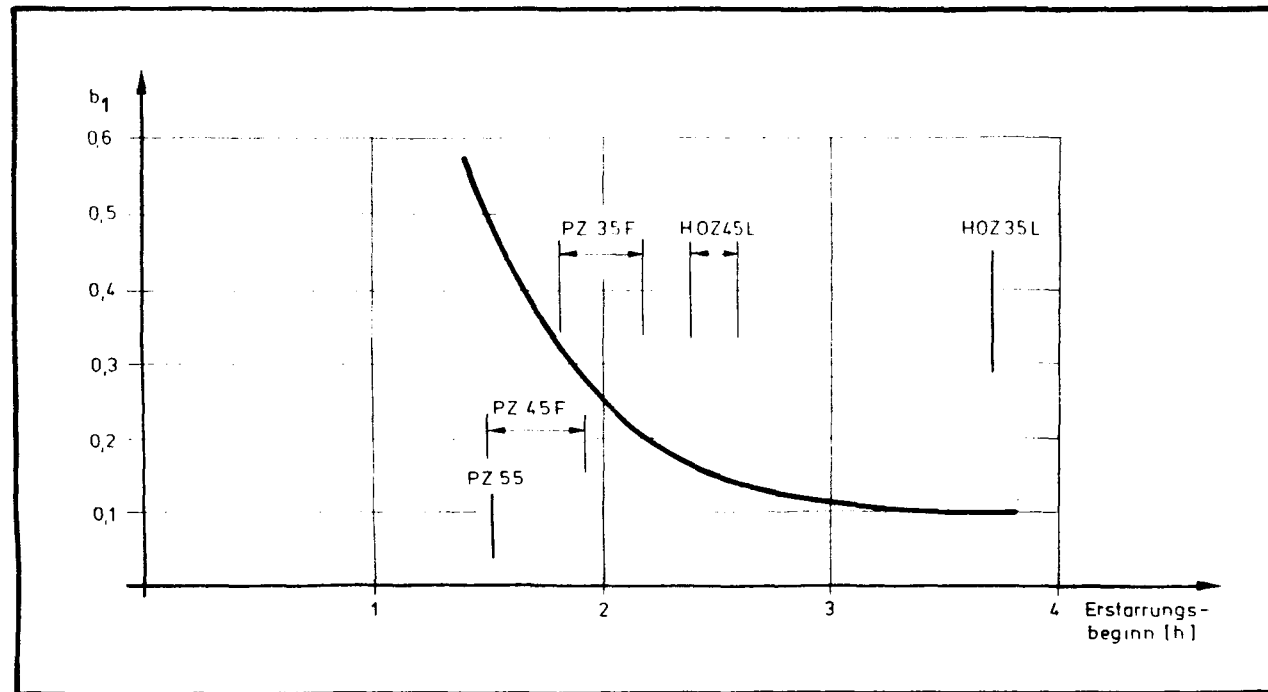


Bild 89: Einfluß des Erstarrungsbeginns der Zemente
auf den Kurvenparameter b_1

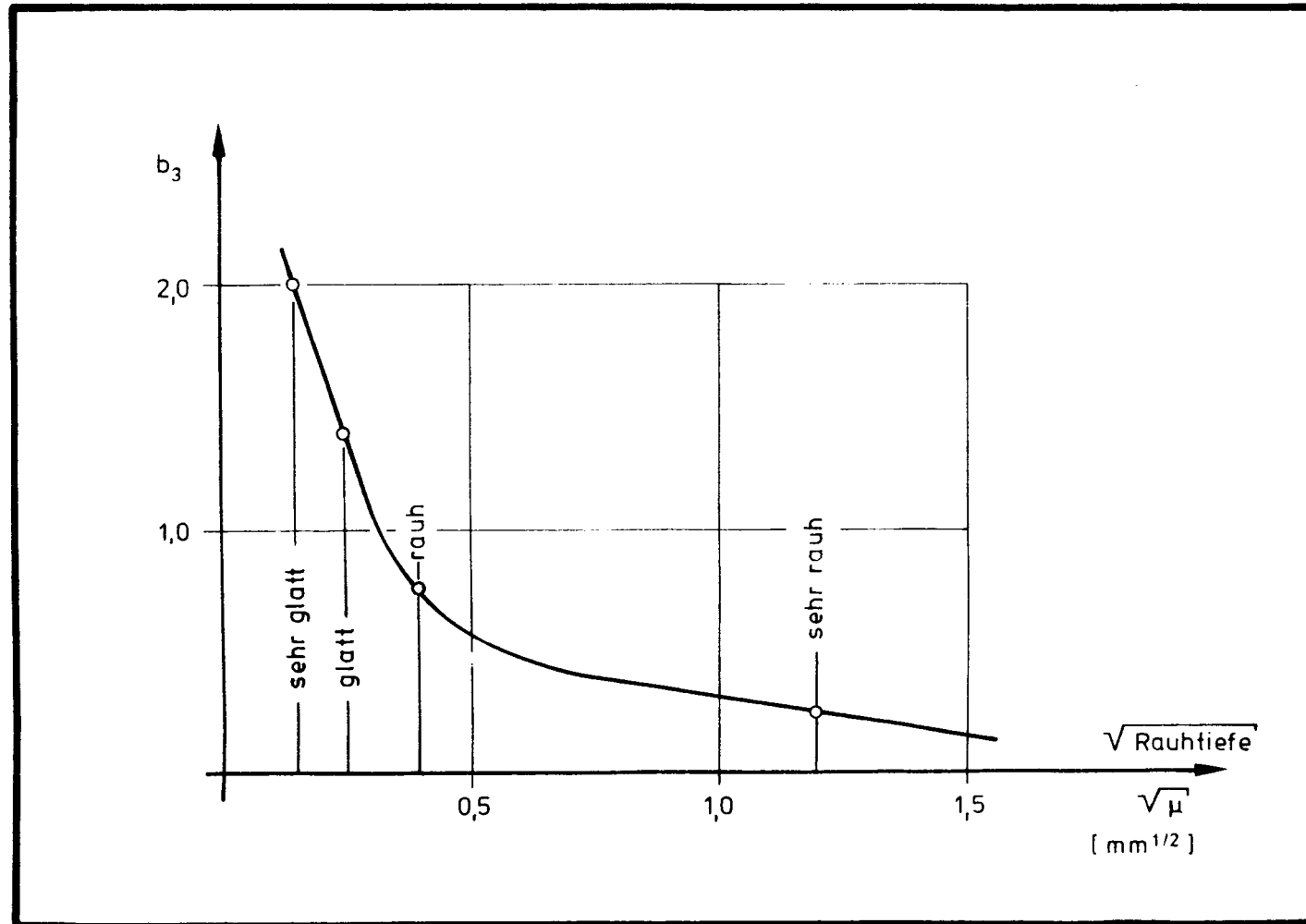


Bild 90: Einfluß der Schalungsrauhigkeit auf den Faktor b_3

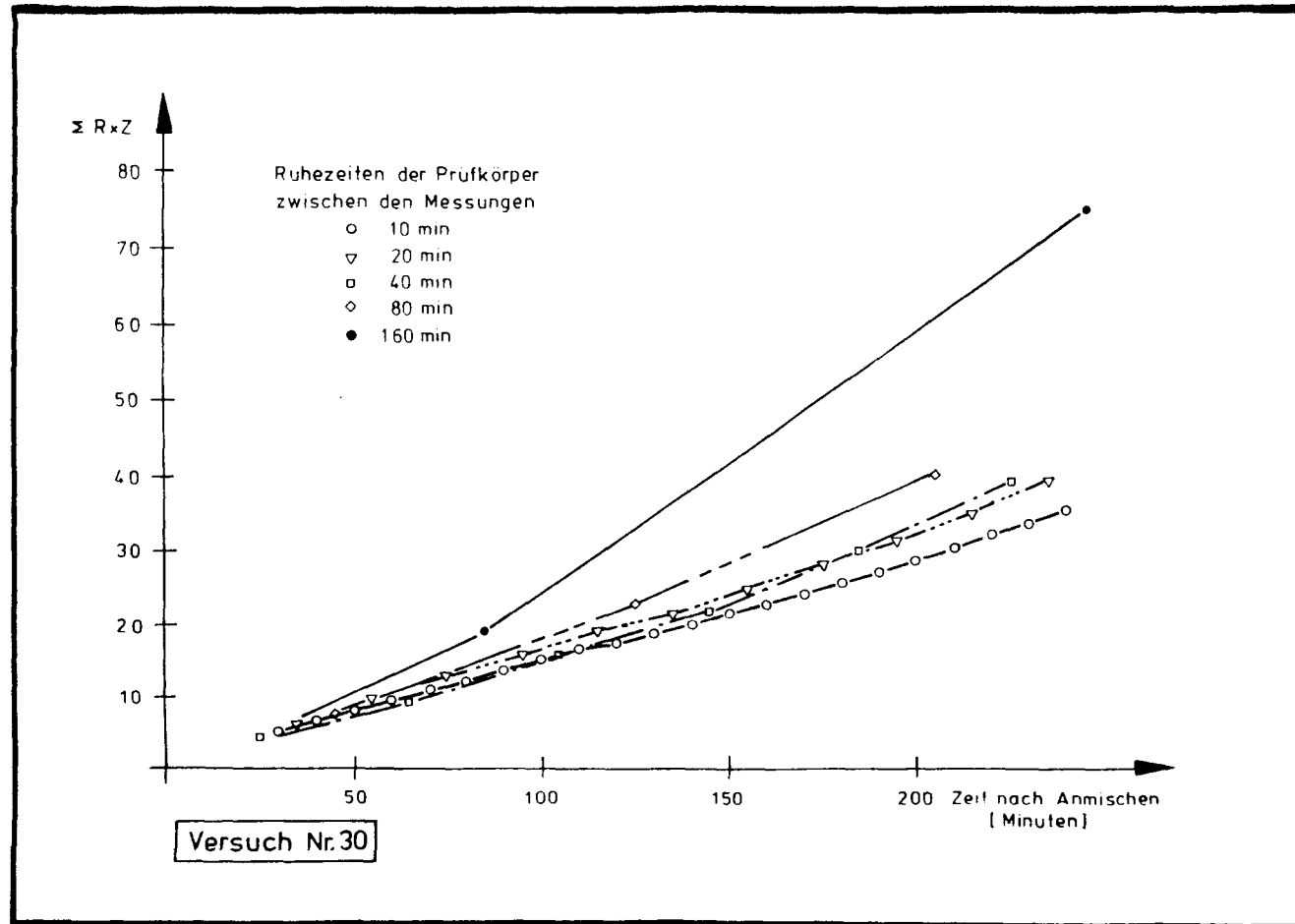


Bild 91: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 30

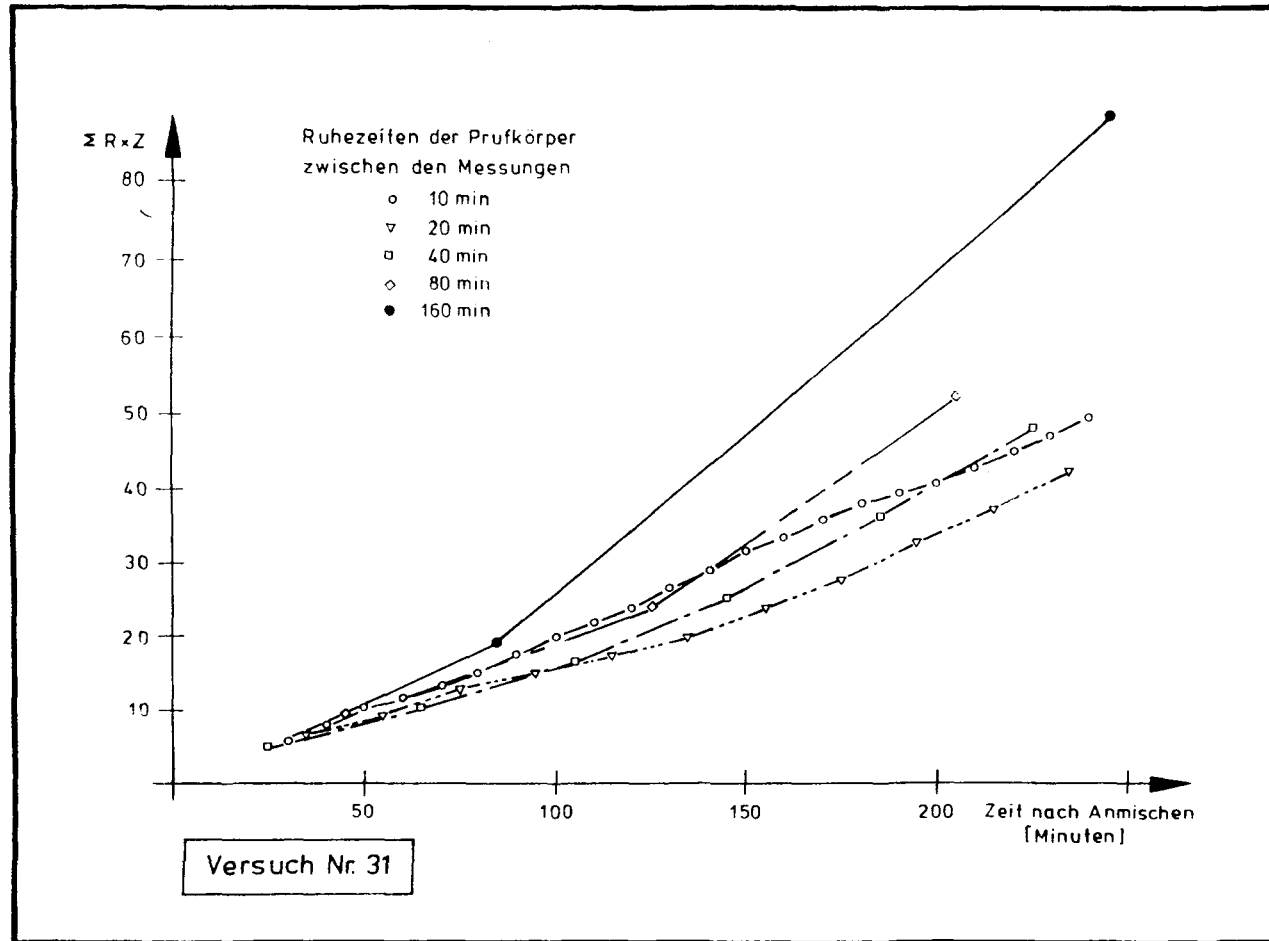


Bild 92: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 31

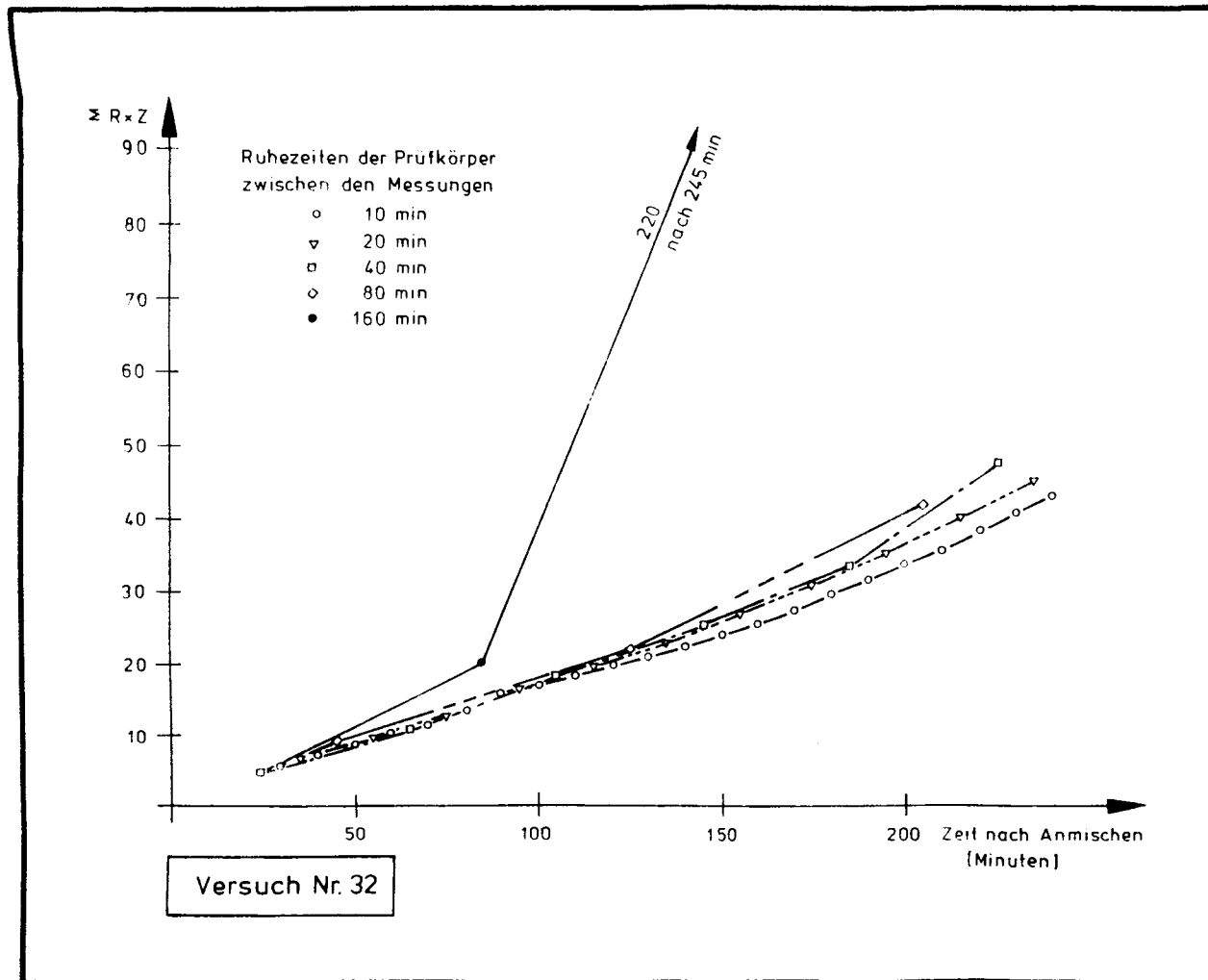


Bild 93: Reibungsversuche
Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)
Versuch Nr. 32

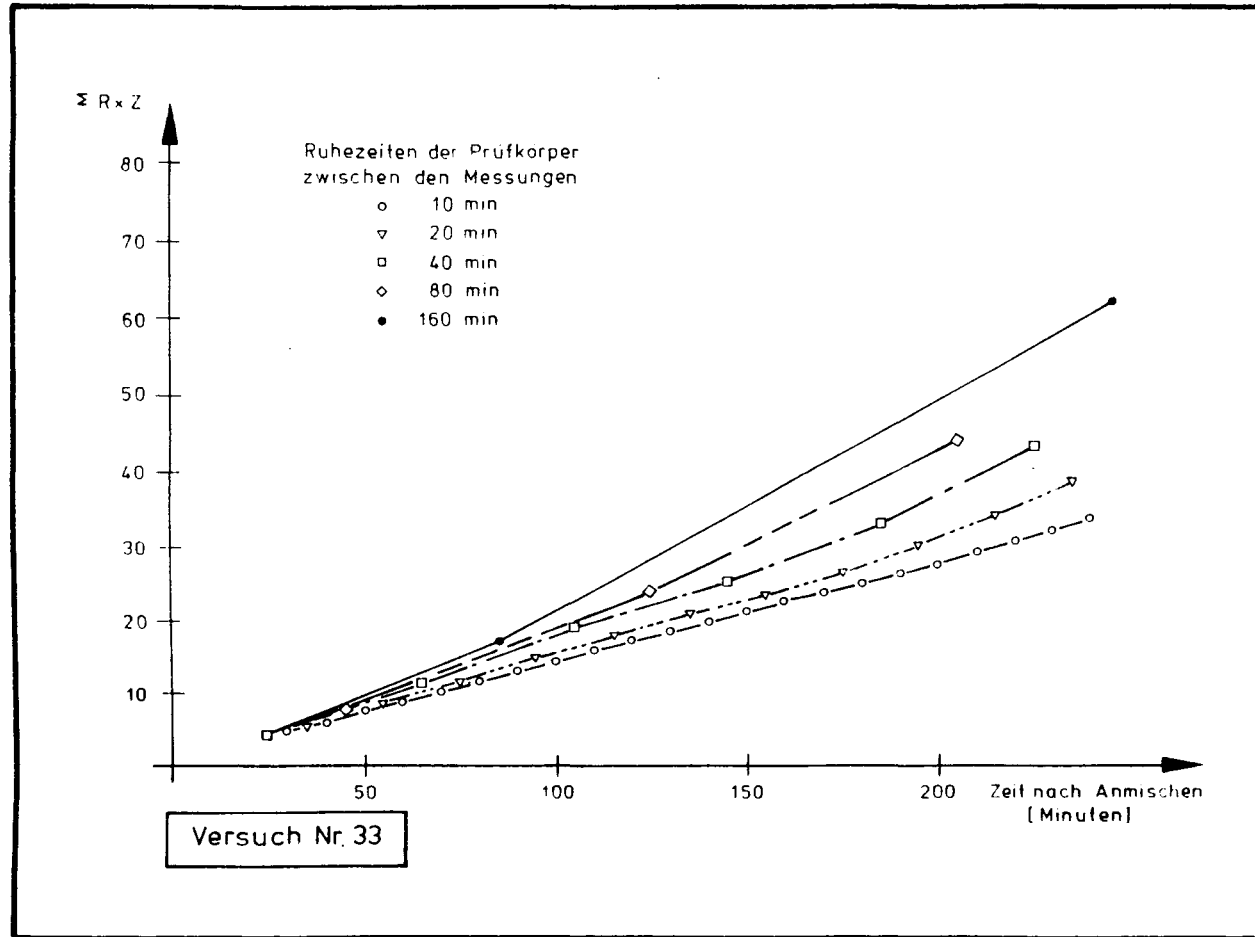


Bild 94: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 33

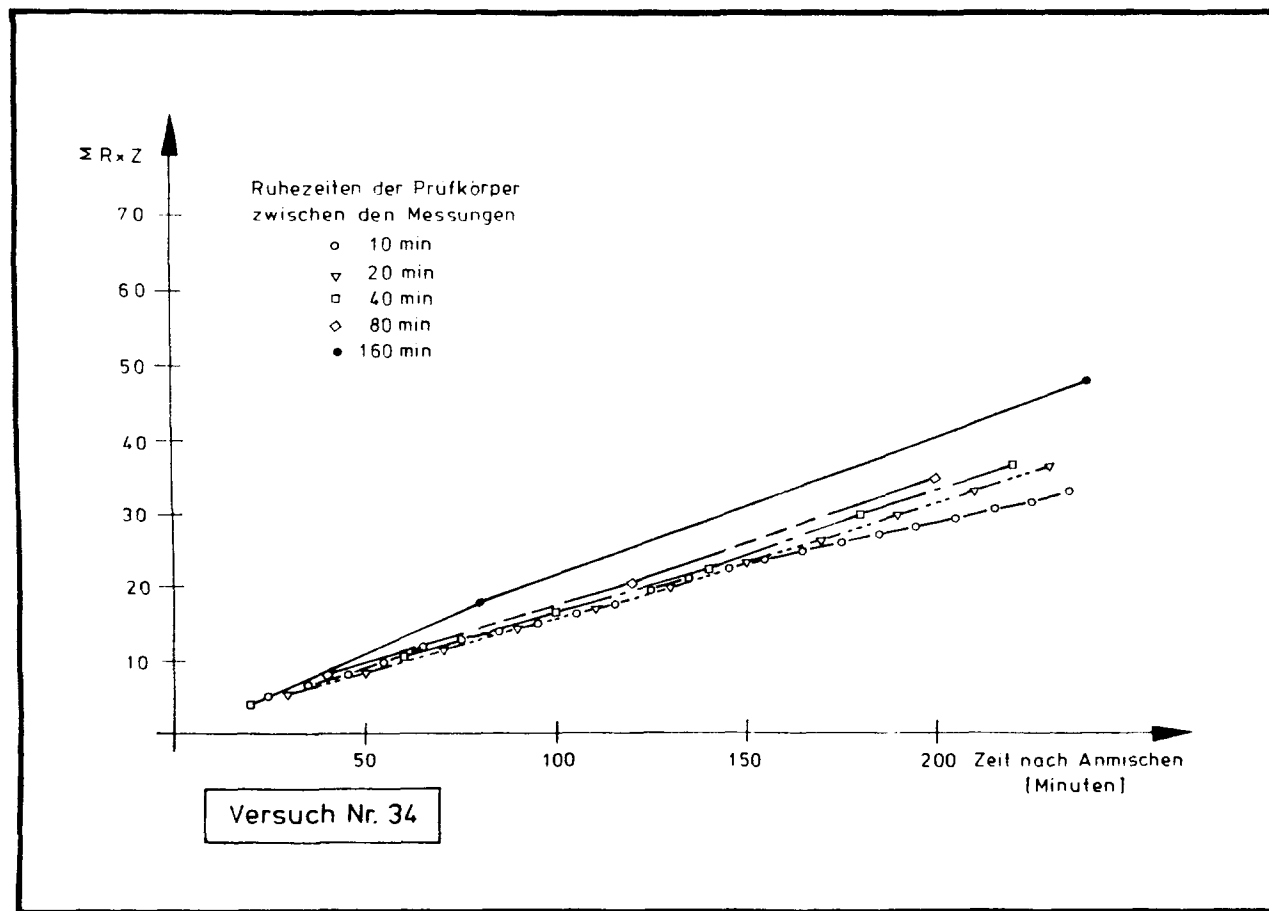


Bild 95: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 34

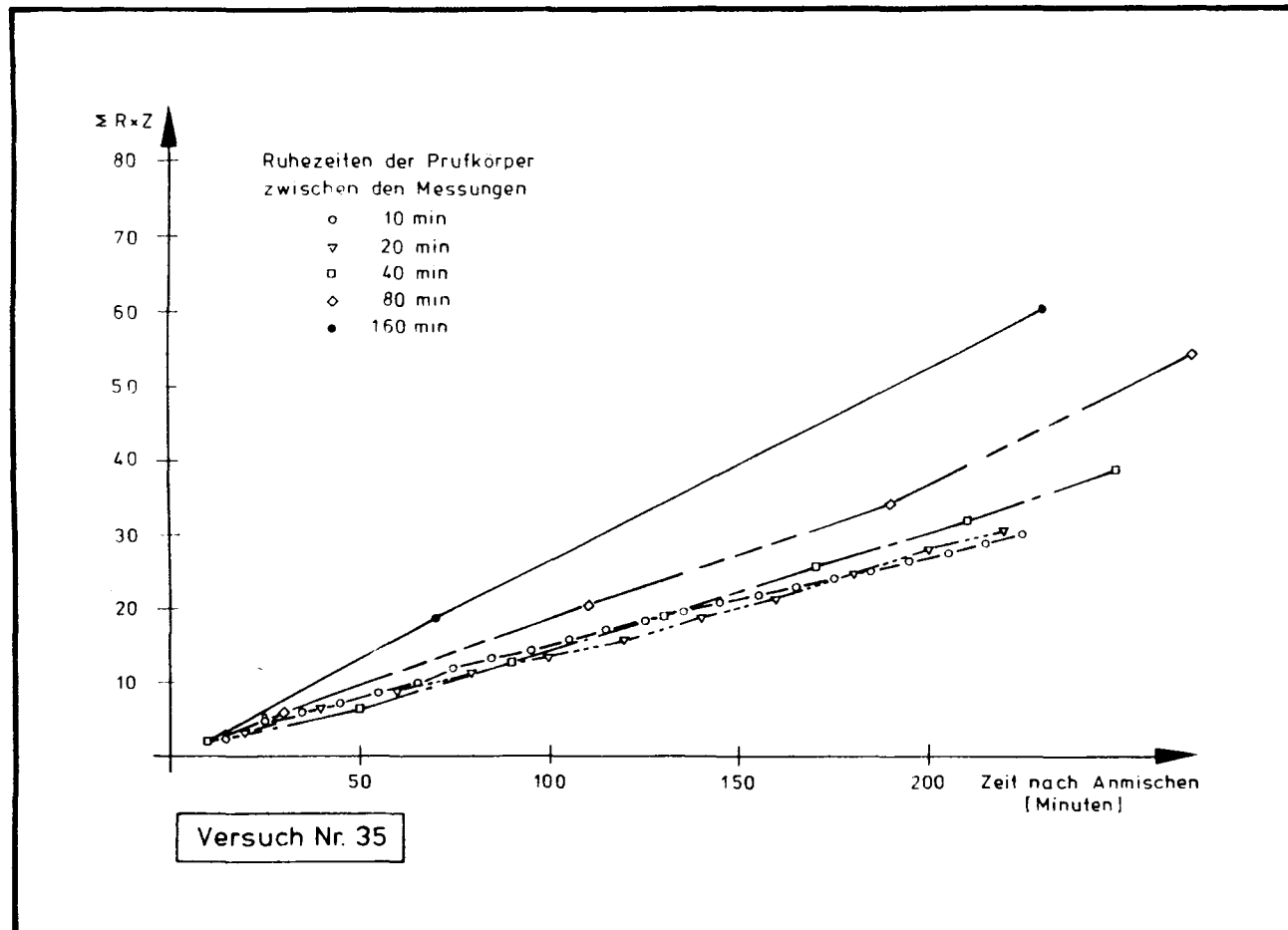


Bild 96: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 35

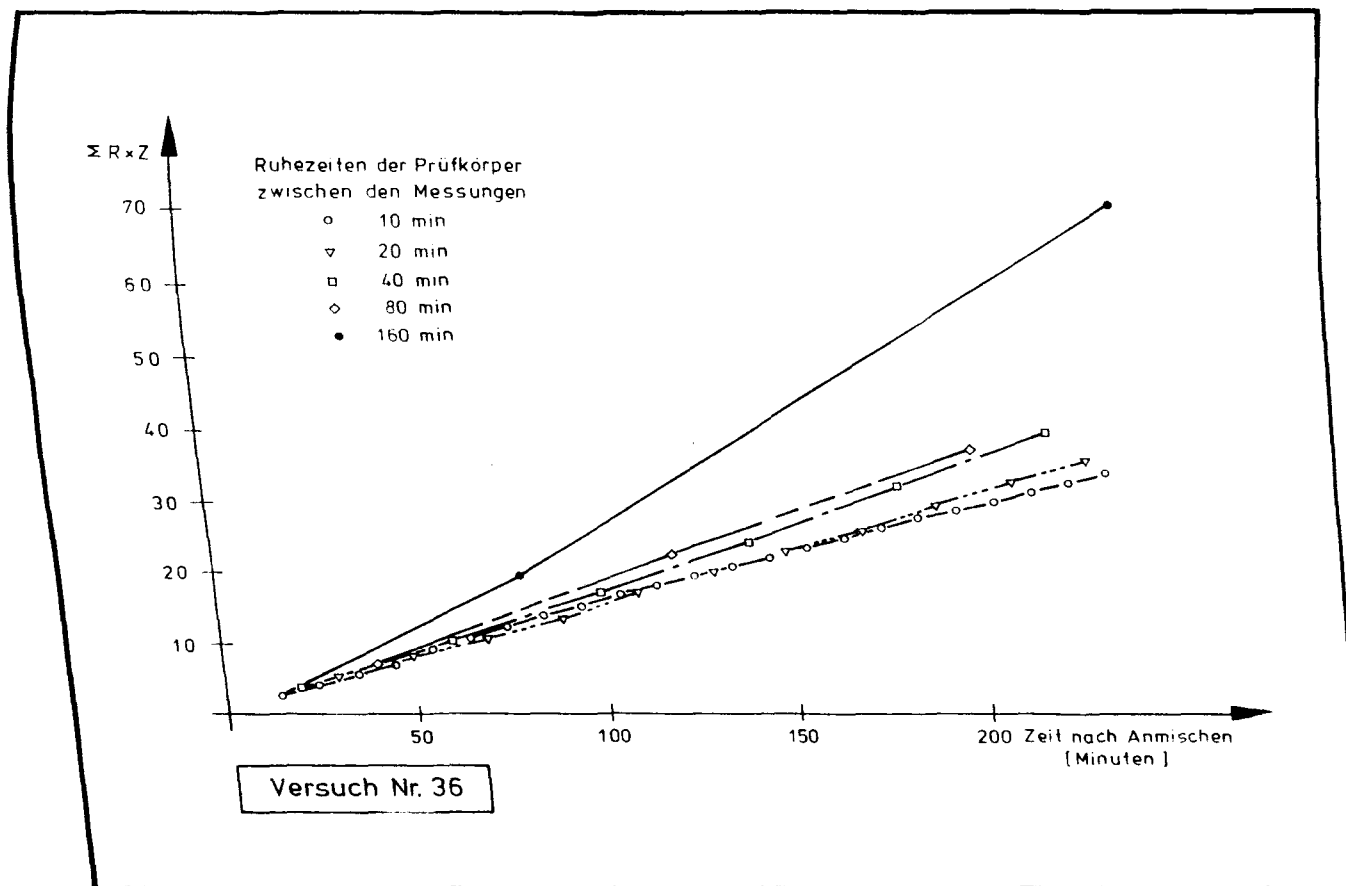


Bild 97: Reibungsversuche
Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)
Versuch Nr. 36

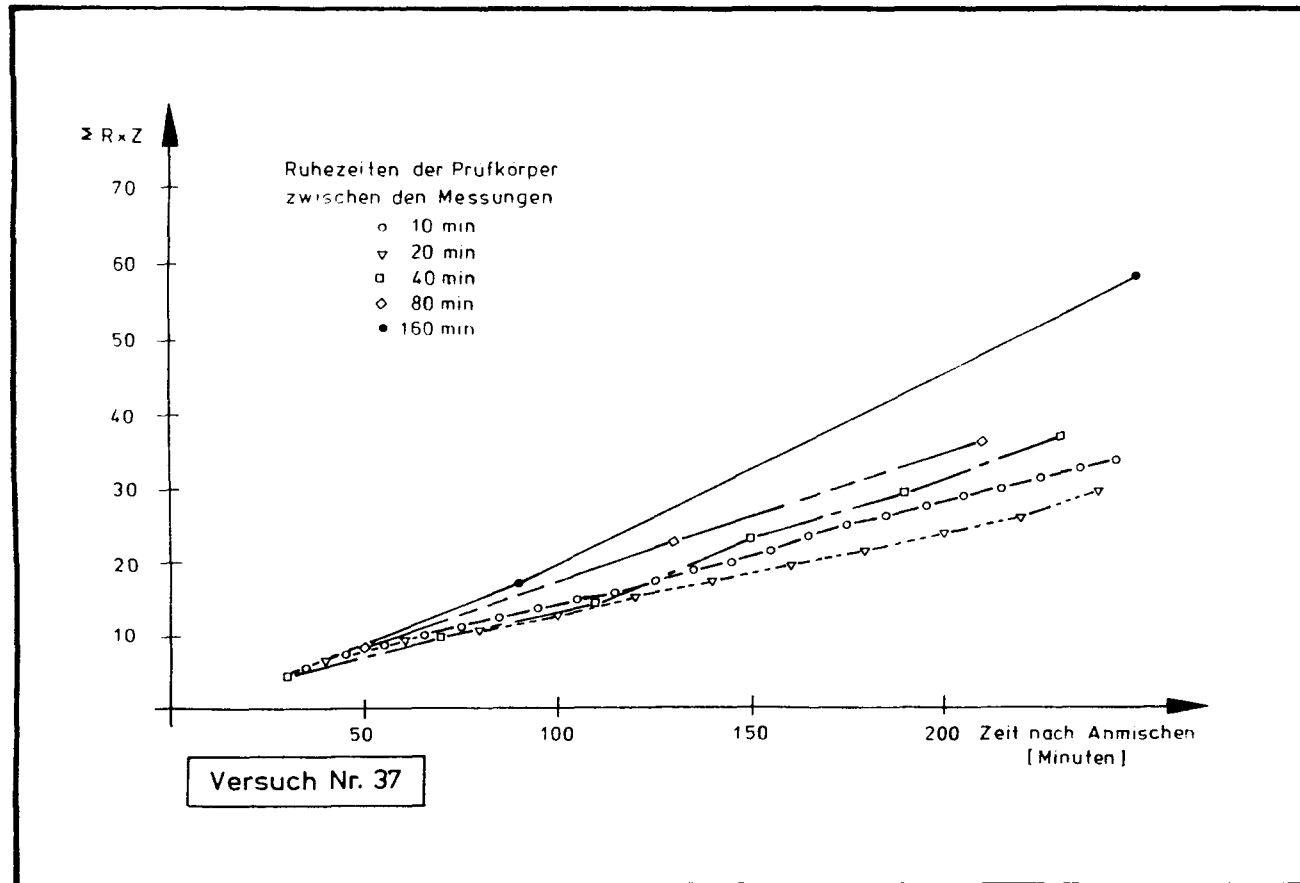


Bild 98: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 37

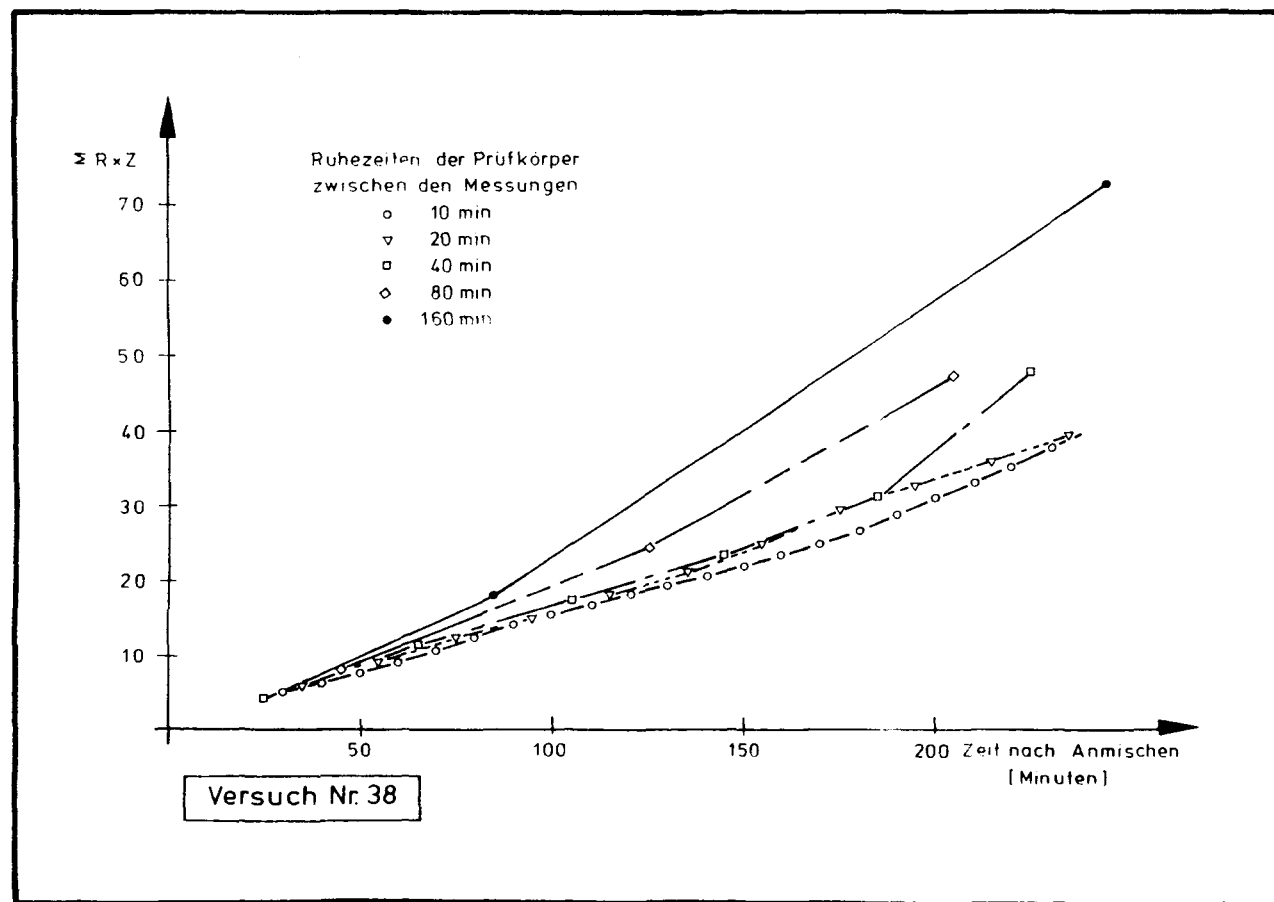


Bild 99: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 38

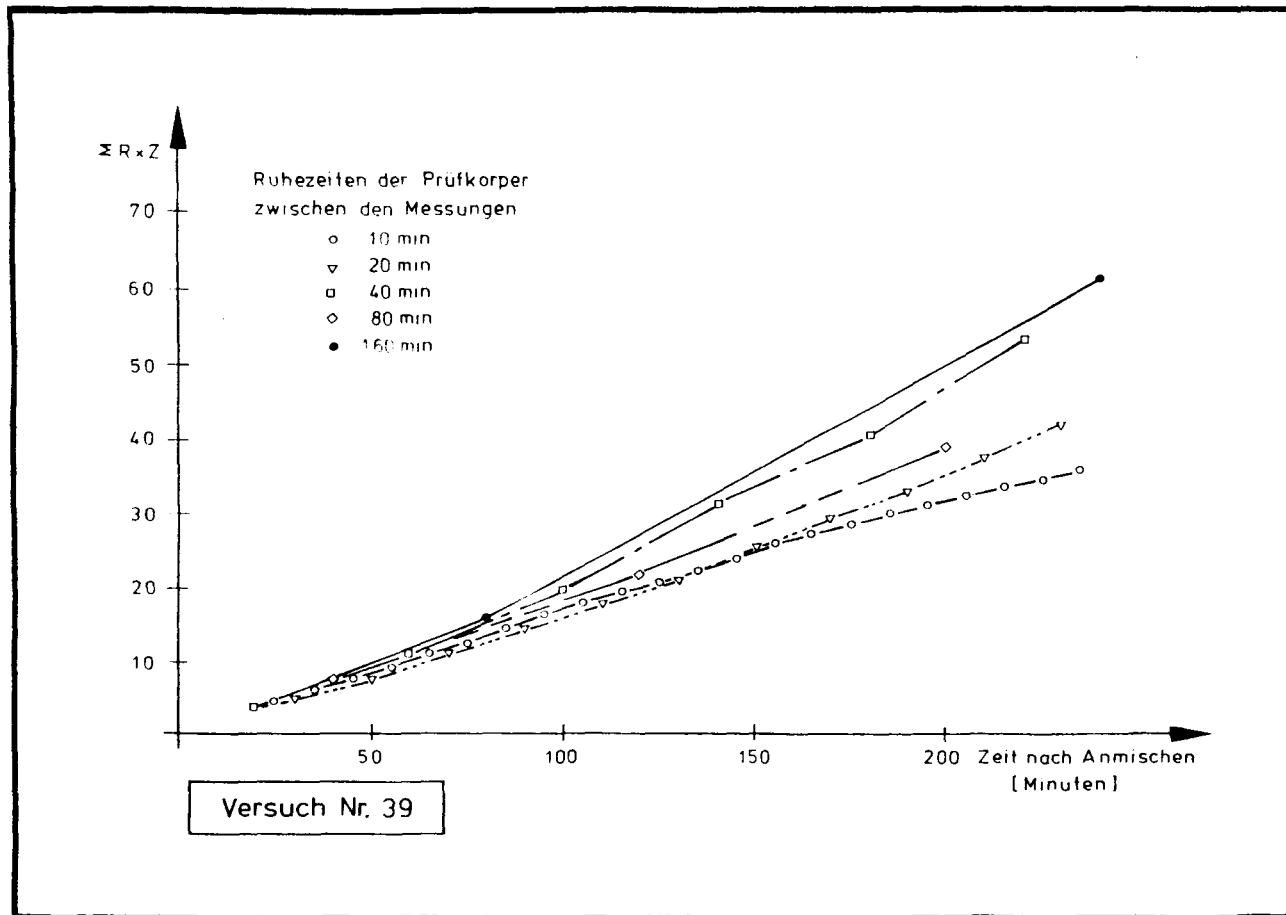


Bild 100: Reibungsversuche
Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)
Versuch Nr. 39

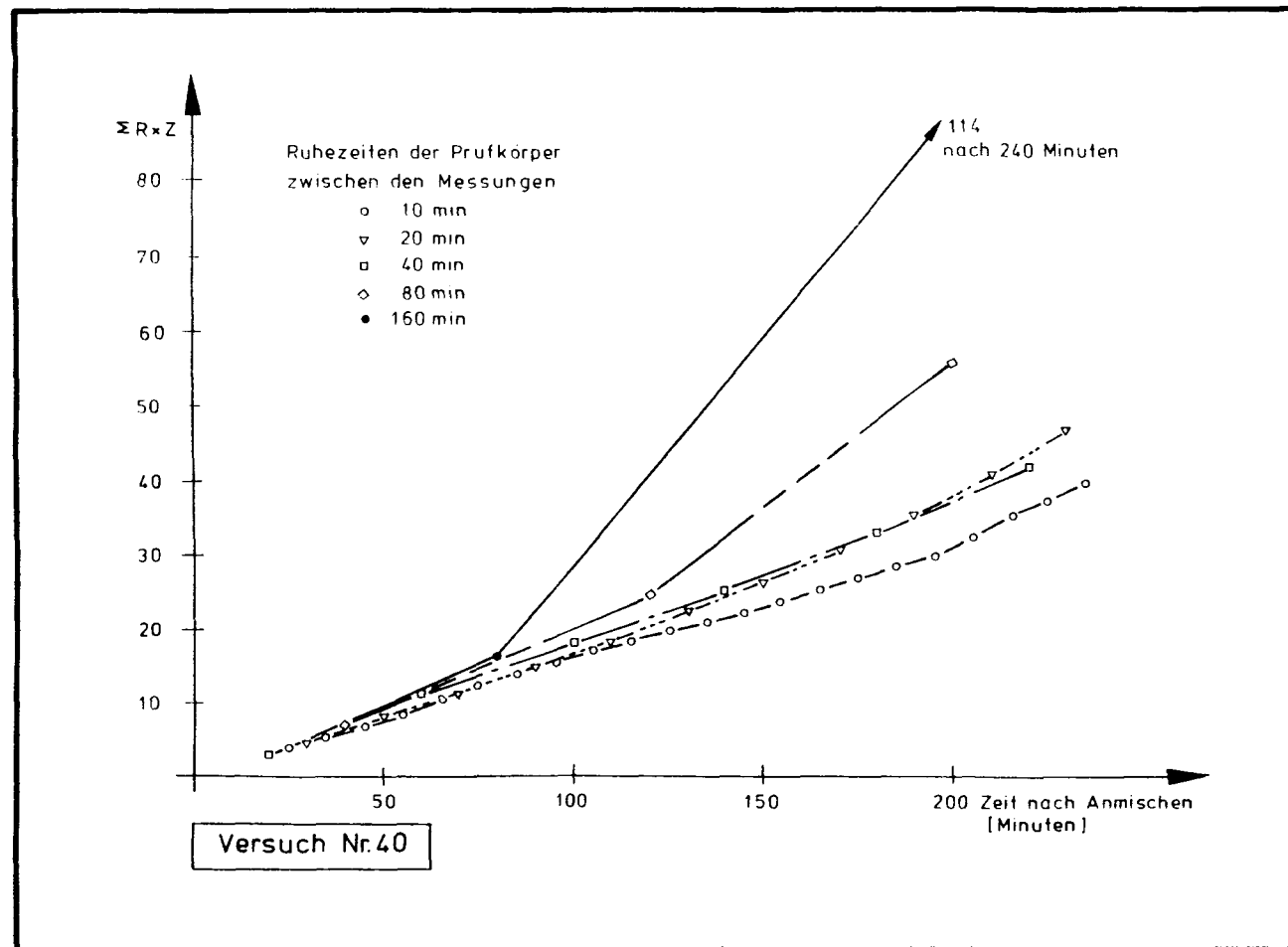


Bild 101: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 40

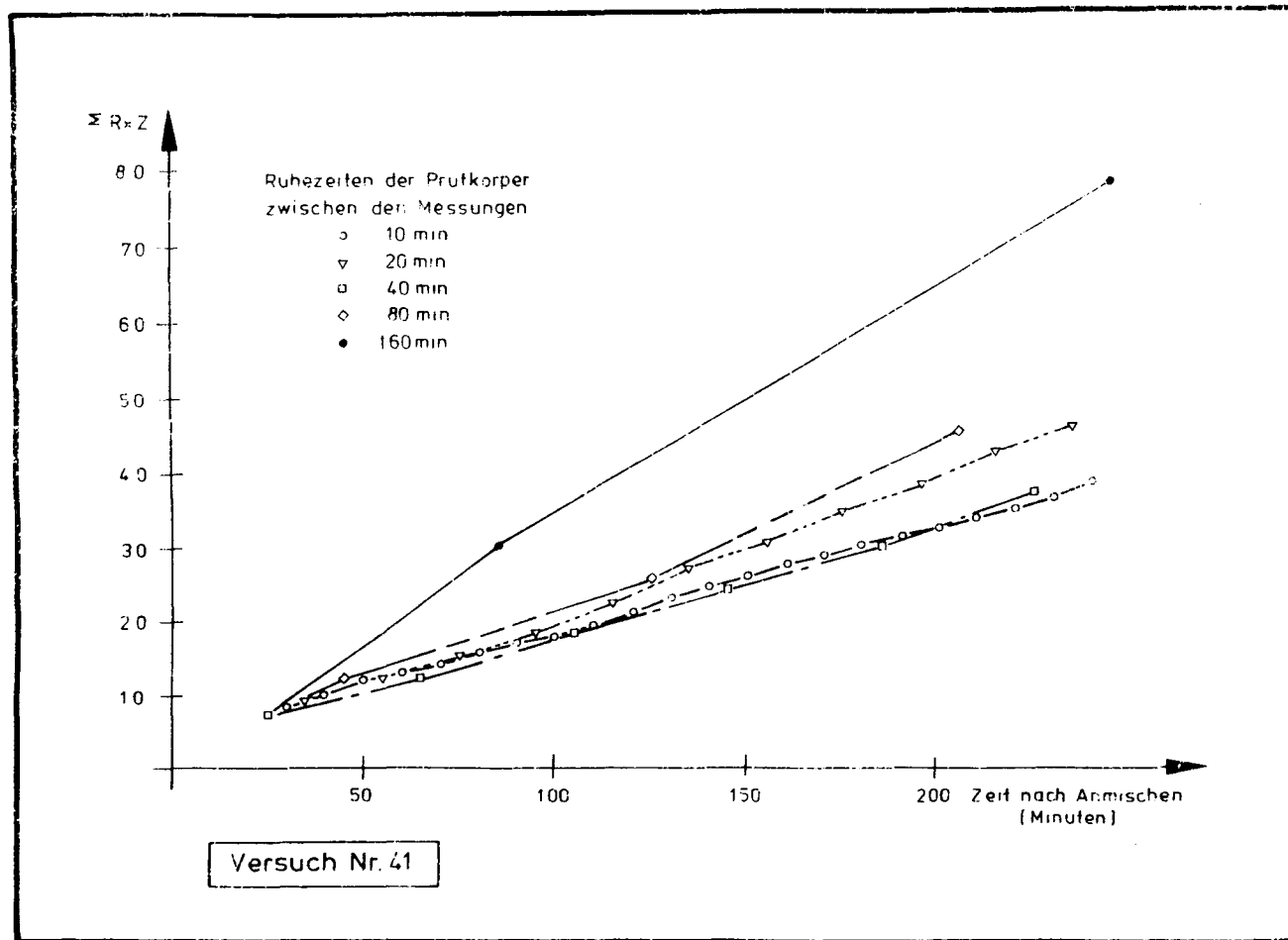


Bild 102: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 41

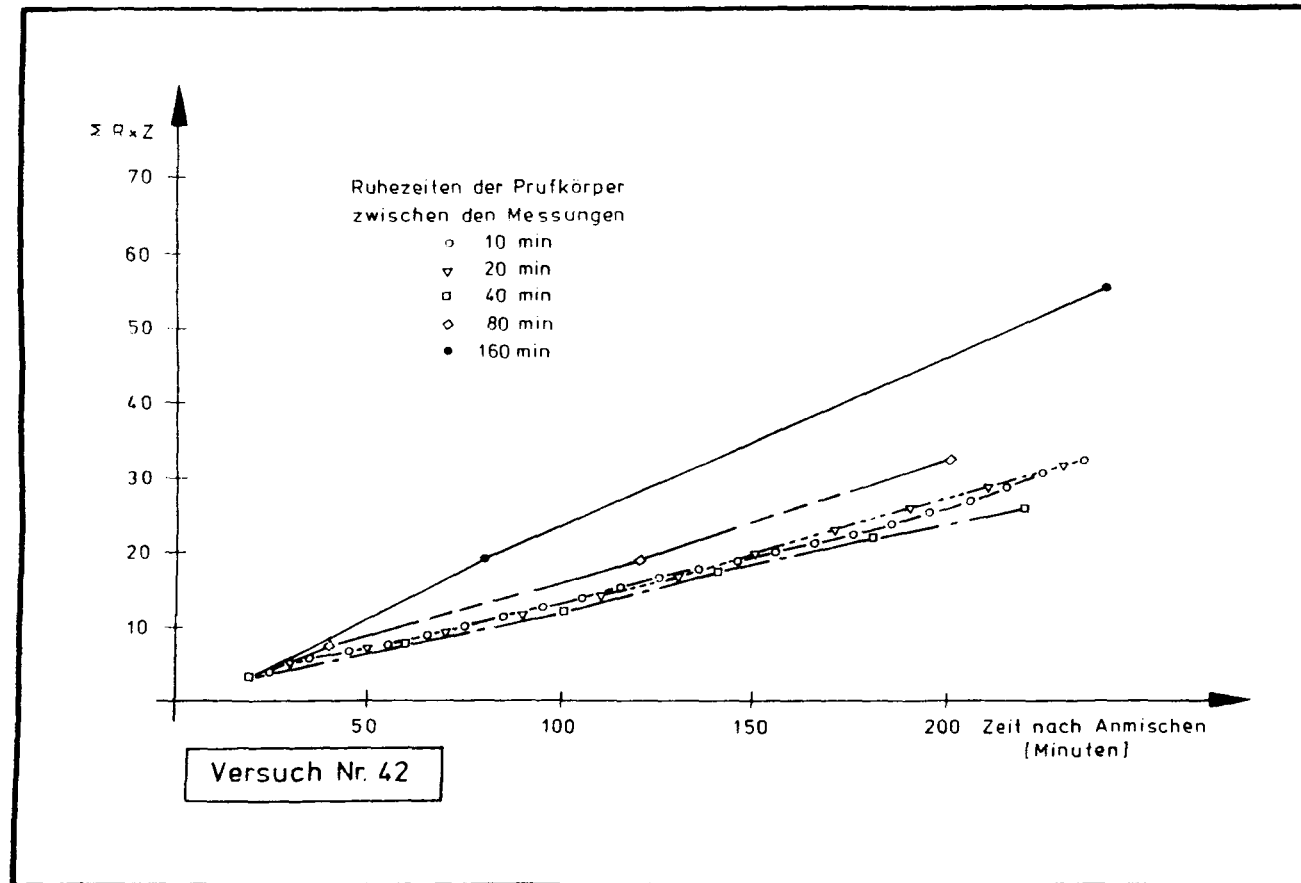


Bild 103: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 42

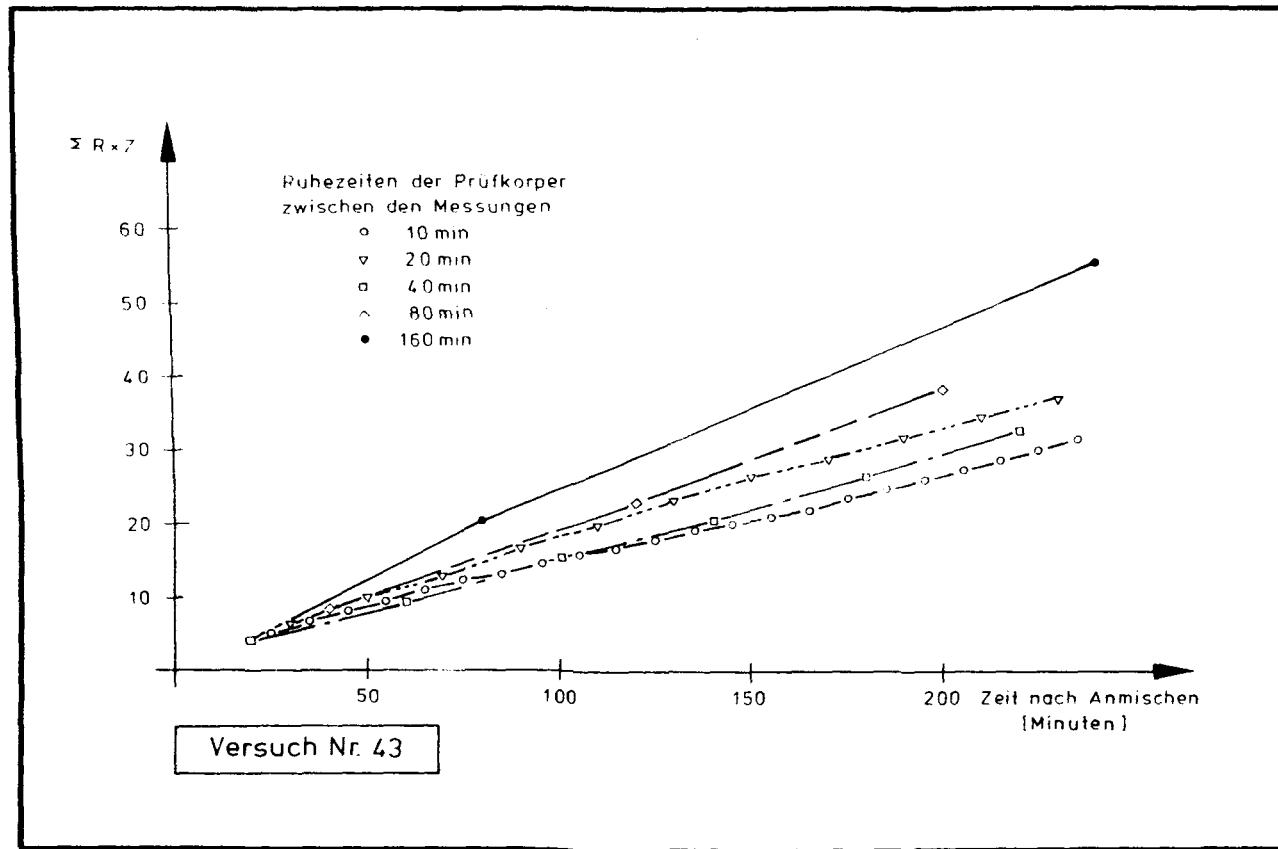


Bild 104: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 43

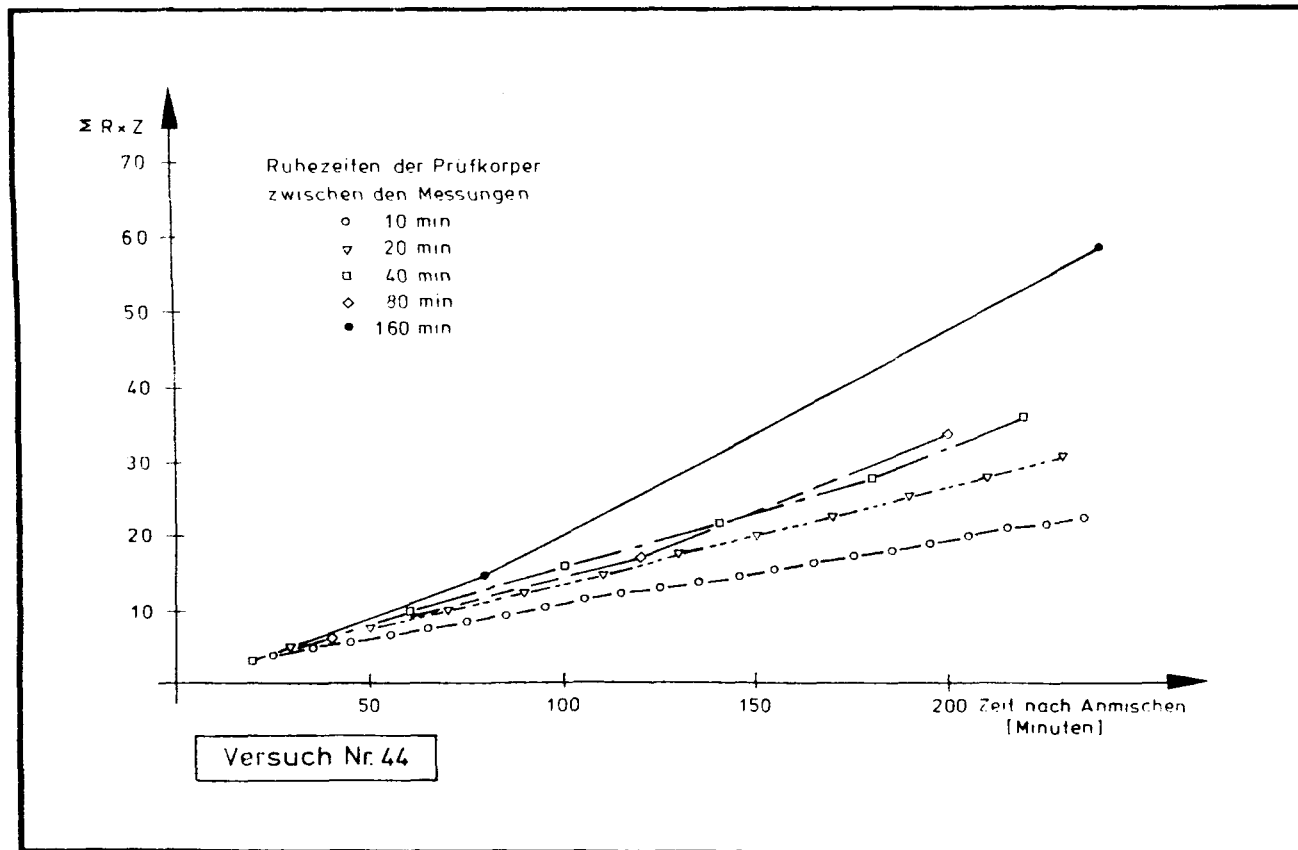


Bild 105: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 44

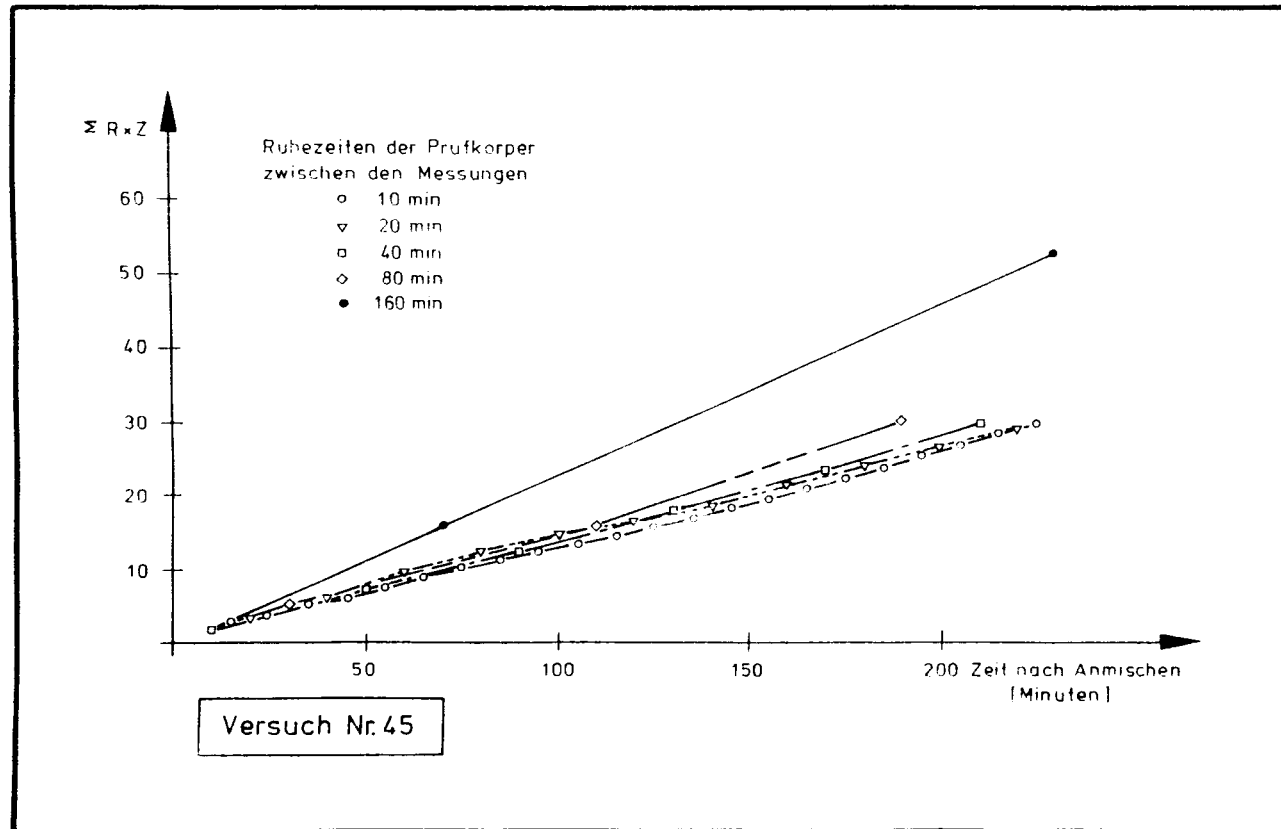


Bild 106: Reibungsversuche

Summenlinien Kraft x Zeit (zwischen zwei Bewegungen)

Versuch Nr. 45

4.2 Auswertung der Baustellenmessungen

Aus den Meßstellenaufzeichnungen wurden manuell die jeweiligen Belastungen der Zug- und Druckmeßdosen entnommen. Es zeigte sich, daß - obwohl die Anordnung der Zugstangen mit den Meßeinrichtungen symmetrisch zur Meßstreckemitte war - die beim Heben der Schalung gemessenen Zugstangenkräfte häufig deutlich unterschiedlich auftraten; verschiedentlich wurden in einer Zugstange sogar negative Werte (Druck) gemessen. Es muß vermutet werden, daß der Druckaufbau des Hydrauliköls in den Hebegeräten nicht gleichmäßig erfolgte, so daß an der Schalung ausmittig angreifende Heberlasten wirkten, bis die Schalung nach Überwinden des Haftverbundes vom Beton gelöst wurde.

Das Eigengewicht der Schalung konnte nicht direkt gemessen werden. An Probestücken aus den verwendeten Materialien wurde das Raumgewicht (für die Hölzer auch im halbtrockenen Zustand und nach fünftägiger Wasserlagerung) bestimmt und das Schalungsgewicht entsprechend den zu den Meßzeitpunkten herrschenden Witterungsbedingungen bei der Ermittlung der Schalungsreibung berücksichtigt.

Die gemessenen Maximalwerte betrugen:

Betondruck auf das obere Kranzholz

$$\max p_{Oh} = 4,3 \text{ kN/m}$$

Betondruck auf das untere Kranzholz

$$\max p_{uh} = 5,7 \text{ kN/m}$$

Schalungsreibung

$$\max p_v = 3,9 \text{ kN/m}$$

Die relativ große Anzahl der Meßwerte läßt es zu, mit statistischen Methoden auf zu erwartende Höchstwerte zu schließen. Als bemessungsbestimmender Wert wird dabei - in Anlehnung an Lastnormen - die 99-%-Fraktile der Lasten angesehen.

Die Auswertung erfolgte für Gruppenlasten von 0,1 kN/m; die Bilder 107 bis 112 zeigen die im Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragenen Summenlinien. Wie die Auswertung zeigt, kann mit ausreichender Genauigkeit für den Gesamt-Schalungsdruck und den Schalungsdruck auf das untere Kranzholz eine Normalverteilung, für den Schalungsdruck auf das obere Kranzholz sowie die Schalungsreibung eine logarithmische Normalverteilung angesetzt werden (Bilder 107 bis 109, 111).

Eine gleichfalls mit Hilfe der Meßwerte durchgeführte Bestimmung der Lage der Resultierenden des Schalungsdrucks ergab als 99-%-Fraktilwert eine Höhe von 0,80 m unter Oberkante (Bild 110), wobei hier wieder deutliche Unterschiede zwischen den Meßreihen vom 03. - 04.06.86 und vom 07.06.86 festzustellen waren.

Eine Bestimmung des 99-%-Fraktilwertes der Schalungsreibung aus den Meßwerten, die nach Ruhezeiten der Schalung von ≤ 10 Minuten gewonnen wurden, zeigt Bild 112. So ermittelt wurde eine Schalungsreibung von 3,5 kN/m (gegenüber den aus allen Meßwerten bestimmten 4,0 kN/m). Auch die Messung am Bauwerk zeigt also, daß die Ruhezeiten der Schalung zwischen zwei Bewegungsvorgängen starken Einfluß auf die Größe der Schalungsreibung hat (vgl. Abschn. 4.1).

Die Werte für den gesamten Schalungsdruck und den Schalungsdruck auf das untere Kranzholz zeigten signifikante Unterschiede zwischen den ersten und zweiten Meßreihen (siehe Bilder 108 und 109). Die Ursache dafür kann nicht eindeutig angegeben werden; es ist zu vermuten, daß der zwischenzeitlich (nach ca. 13 m Gleithöhe) eingetretene Verschleiß der Schalung die höheren Werte der Meßreihe am 07.06.86 verursacht hat.

Die 99-%-Fraktilwerte liegen gemäß Auswertung bei etwa

5,6 kN/m für Schalungsdruck auf das obere
Kranzholz (Bild 107),
5,3 kN/m für Schalungsdruck auf das untere
Kranzholz (Bild 108),
6,4 kN/m für den gesamten Schalungsdruck
(Bild 109),
4,0 kN/m für die Schalungsreibung (Bild 111).

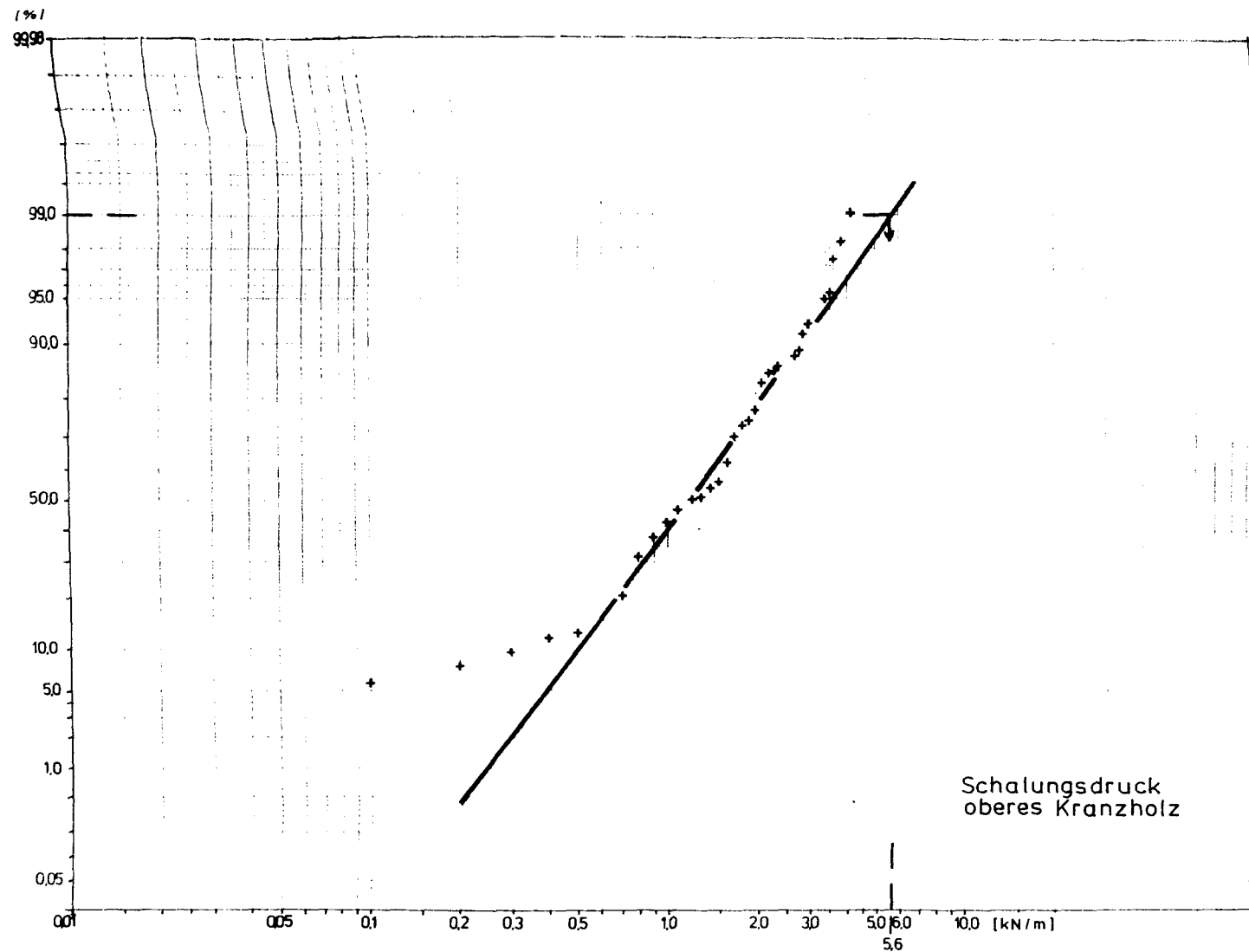


Bild 107: Ergebnisse der Baustellenmessung
Schalungsdruck auf oberes Kranzholz (oberes Rahmenholz)

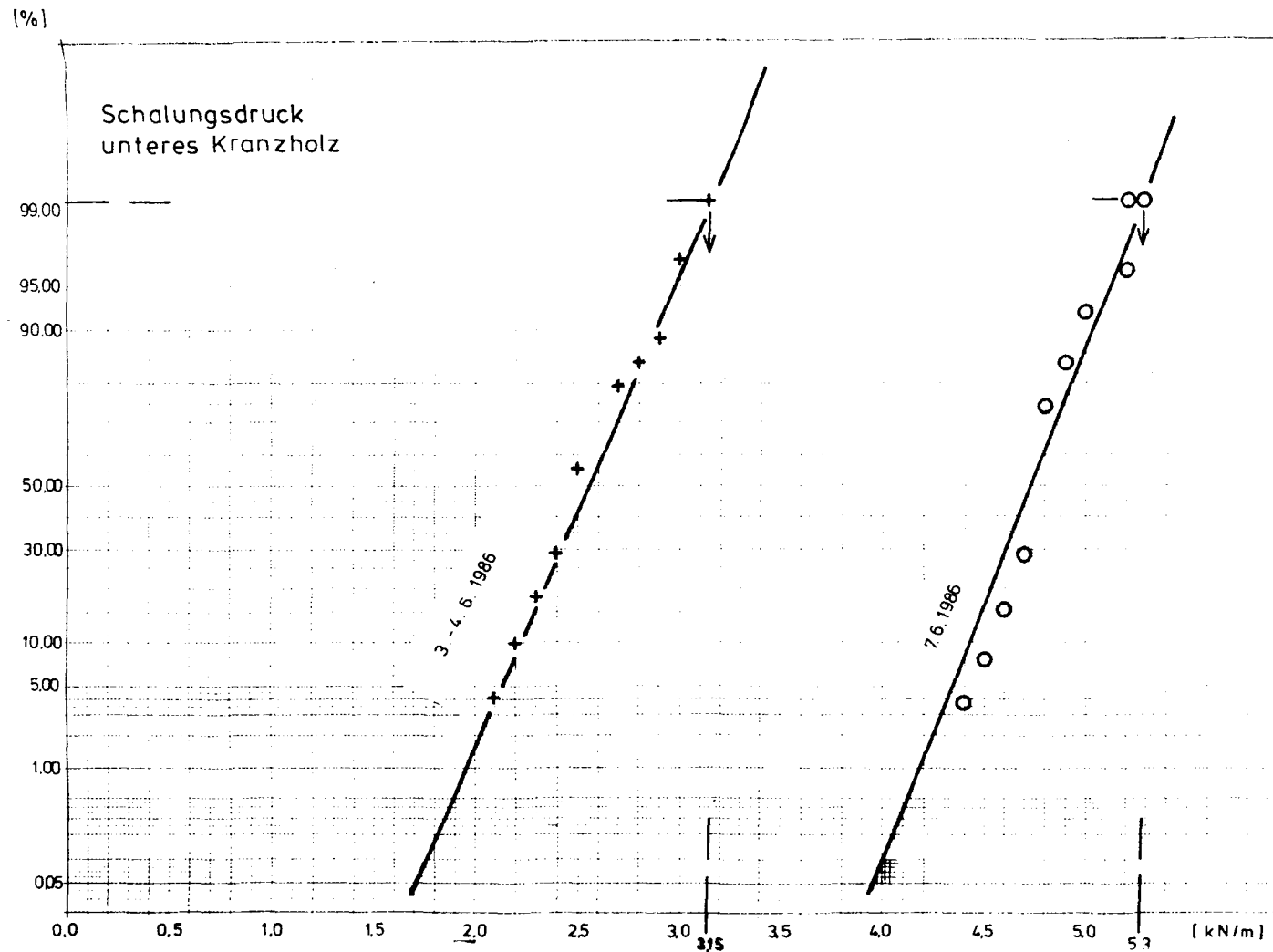


Bild 108: Ergebnisse der Baustellenmessung
Schalungsdruck auf unteres Kranzholz (unteres Rahmenholz)

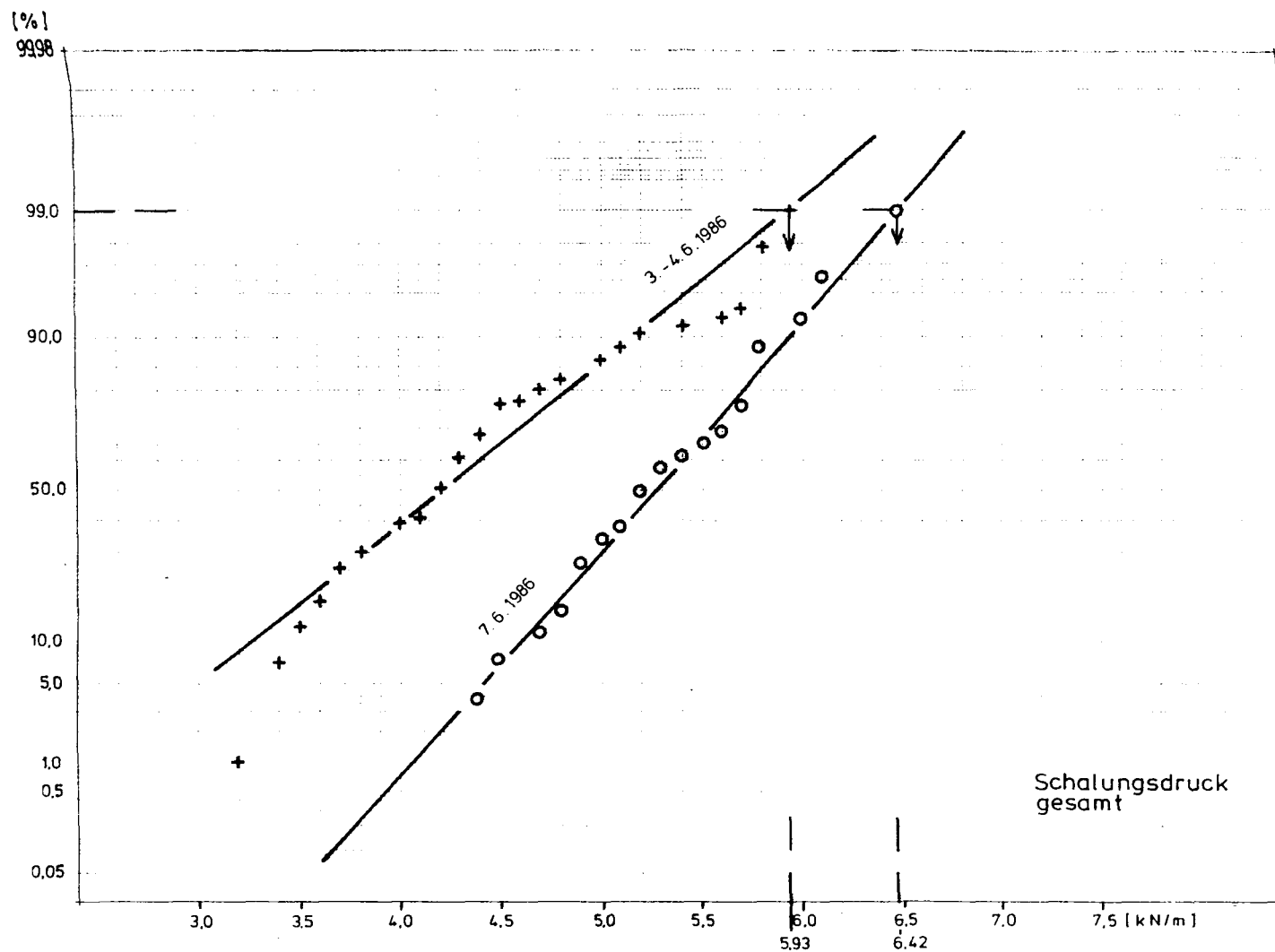


Bild 109: Ergebnisse der Baustellenmessung
Schalungsdruck gesamt

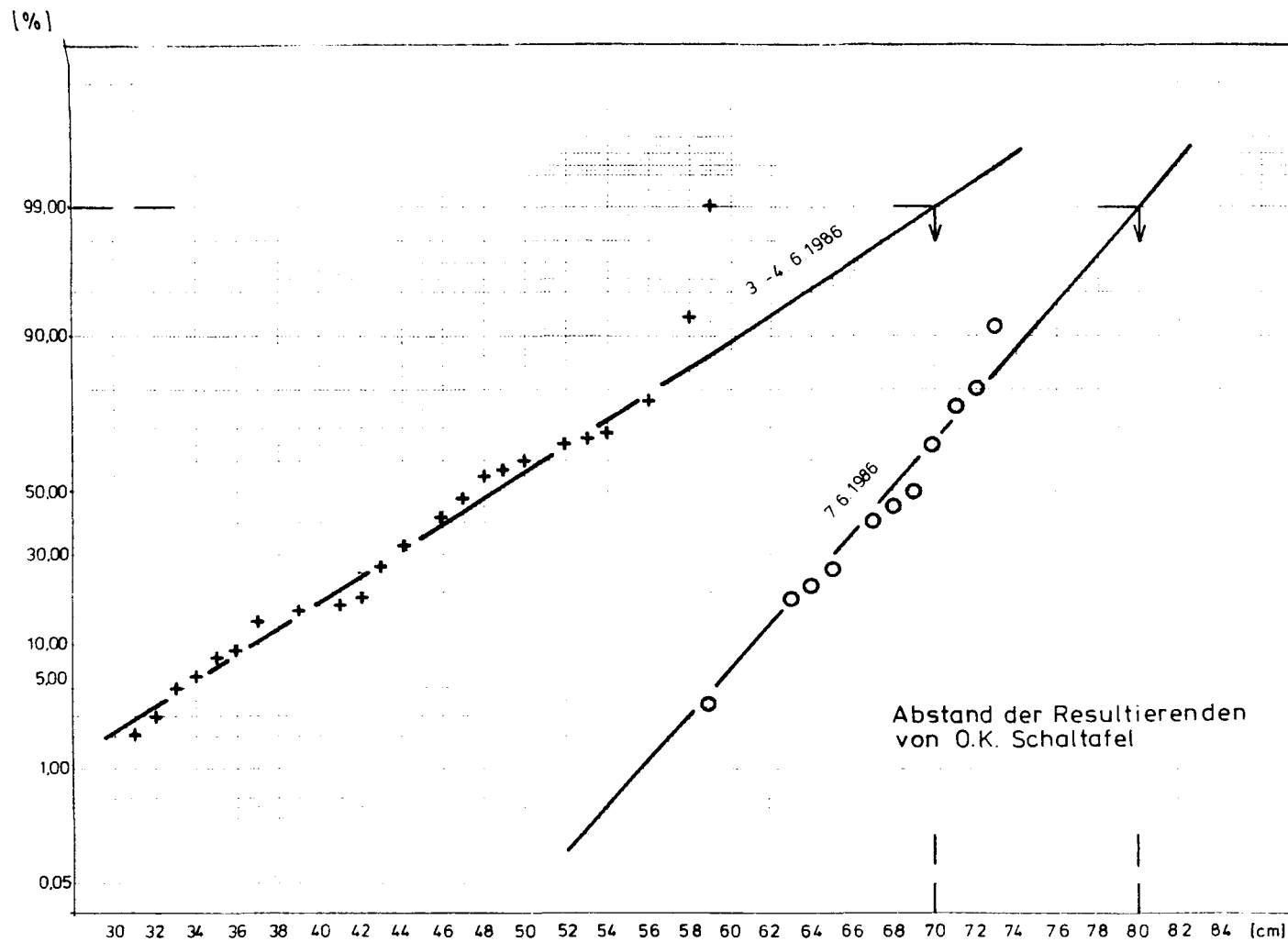


Bild 110: Ergebnisse der Baustellenmessung

Abstand der Resultierenden des Schalungsdrucks von O.K. Schaltafel

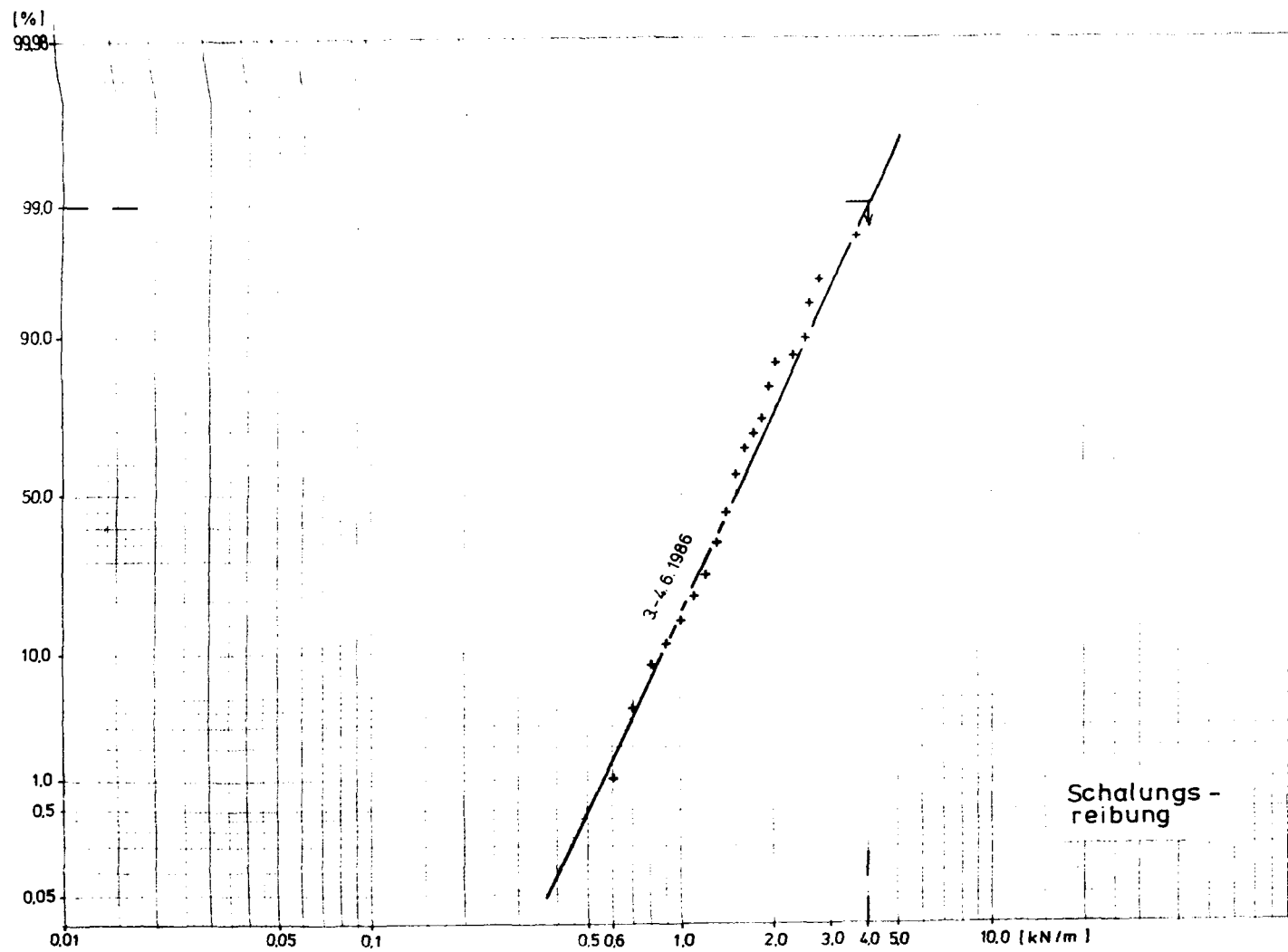


Bild 111: Ergebnisse der Baustellenmessung
Schalungsreibung

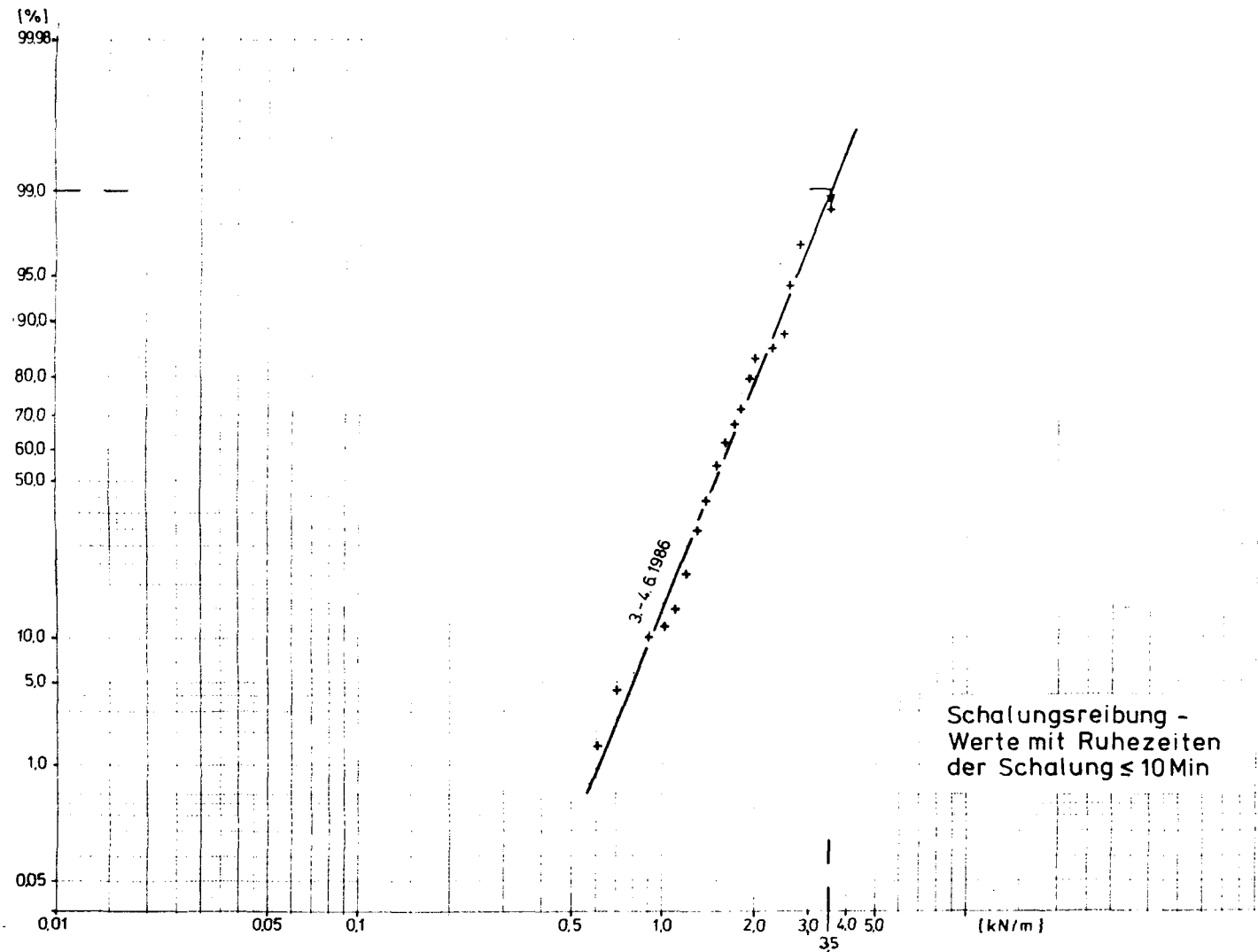


Bild 112: Ergebnisse der Baustellenmessung
Schalungsreibung bei Ruhezeiten der Schalung ≤ 10 Minuten

4.3 Schlußfolgerungen aus den eigenen Baustellenmessungen

Die Ergebnisse der Baustellenmessungen zeigen die große Streubreite der gemessenen Werte. Sehr deutlich wird, daß die am oberen Kranzholz auftretenden Schalungsdrücke wesentlich größer sind, als sie auch bei Ansatz hydrostatischer Druckverteilung aus dem Frischbeton zu erwarten wären. Als Ursache hierfür können Zwängungen, herrührend aus ungleicher Schalungsbewegung, vermutet werden. Wenn beispielsweise beim Ausrichten der Gleitbühne die Schalung auf den Beton drückt, sind Pressungen zu erwarten, die sicher ein Vielfaches der Werte aus hydrostatischem Betondruck erreichen können - vergleichbar den Verhältnissen zwischen aktivem und passivem Erddruck. Verkantungen der Gleitbühne werden infolge ungleicher Belastung der Hebegeräte und des zeitlich nicht gleichzeitigen Kraftangriffs der Heber (bedingt durch die Druckverhältnisse im Hydrauliksystem) unvermeidlich immer auftreten und erzwingen nach einer gewissen Anzahl von Hubvorgängen ein Nachrichten der Gleitbühne. Meßwerte aus durchgeführten Versuchen zur Ermittlung des Schalungsdrucks, bei denen als Versuchskörper ebene, nicht im Bauwerksverband befindliche Wandstücke benutzt wurden, müssen daher hinsichtlich der Übertragbarkeit der Werte des Schalungsdrucks auf Baustellenverhältnisse skeptisch beurteilt werden. Das gleiche gilt für theoretische Untersuchungen, die ebenfalls beim heutigen Wissensstand als nicht geeignet erscheinen, den Schalungsdruck bei einer Bauausführung mit einer Gleitschalung zutreffend zu bestimmen.

Es erscheint sinnvoll, zur Festlegung von Bemessungslasten für Gleitschalungen weitere Baustellenmessungen durchzuführen und mit statistischen Methoden auszuwerten. Es sollten unterschiedliche Witterungsverhältnisse, weitgehend alle gebräuchlichen Betonzusammensetzungen sowie verschiedene Schalungsmaterialien in die Untersuchungen einbezogen werden.

5. Empfehlung zum Ansatz der Größe des Schalungsdruckes bei Gleitschalungen

Ein Vergleich der gemessenen Werte des Schalungsdruckes mit den Lastansätzen gem. DIN 18 218 zeigt, daß nach dieser Vorschrift ermittelte Werte des gesamten Schalungsdruckes deutlich größer sind als die Meßwerte. Insofern bestehen keine Sicherheitsbedenken gegen die Anwendung der DIN 18 218 bei Gleitschalungen, wenn beachtet wird, daß im Gegensatz zum Ansatz der Norm auch im oberen Bereich der Schalung erhebliche Schalungsdrücke auftreten.

Alle in Abschnitt 2 aufgeführten Empfehlungen zur Ermittlung der Größe des Schalungsdruckes sowie die aus Laborversuchen abgeleiteten Ansätze /16, 25 / (vgl. Abschnitt 2) gehen davon aus, daß der Schalungsdruck an der Schalungsoberkante gleich Null ist. Dagegen zeigen die eigenen Baustellenmessungen, daß auch im oberen Bereich der Schalung erhebliche Schalungsdrücke - verursacht wahrscheinlich durch Zwängungen - auftreten. Ein diese Zwängungen abdeckender Zuschlag zu Meßwerten des Schalungsdruckes war bereits von Hermann vorgeschlagen worden /11/.

Die wenigen Meßwerte aus Baustellenmessungen erlauben es nicht, allgemeingültige Empfehlungen für den Ansatz des Schalungsdruckes zu formulieren. Für Bauausführungen, bei denen in etwa gleiche Bedingungen herrschen wie bei der Baustelle in Bremen (an der die Meßwerte ermittelt wurden), also etwa gleiche Betonzusammensetzung, Temperatur und Gleitgeschwindigkeit, kann der Schalungsdruck sicher auch in gleicher Größe - wie an der Baustelle gemessen - erwartet werden.

Für Praxisanwendungen sollten die Lastansätze in möglichst einfacher Form angegeben werden. Dies beachtend, kann aus den Ergebnissen der Baustellenmessungen abgeleitet werden, daß zur Bemessung

- der Heberböcke und des unteren Kranzholzes der Schalungsdruck von OK Schalung linear ansteigend (hydrostatischer Betondruck, $\rho = 25 \text{ kN/m}^3$) bis Mitte Schalungshöhe, dann wieder linear abfallend bis auf den Wert Null in UK Schalung,

und

- zur Bemessung des oberen Kranzholzes im oberen Schalungsbereich (OK Schalung bis Mitte Schalung) der Schalungsdruck konstant mit $p_h = \rho \cdot H/2$ anzunehmen ist, darunter bis auf Null in UK Schalung abfallend (Bild 113).

Dieser Ansatz ergibt eine befriedigende Übereinstimmung mit den Meßwerten; in Tabelle sind die aus den Baustellen abgeleiteten 99-%-Fraktilwerte des Schalungsdruckes den gerechneten Werten (unter Berücksichtigung der Geometrie der Schalung, an der gemessen wurde) gegenübergestellt.

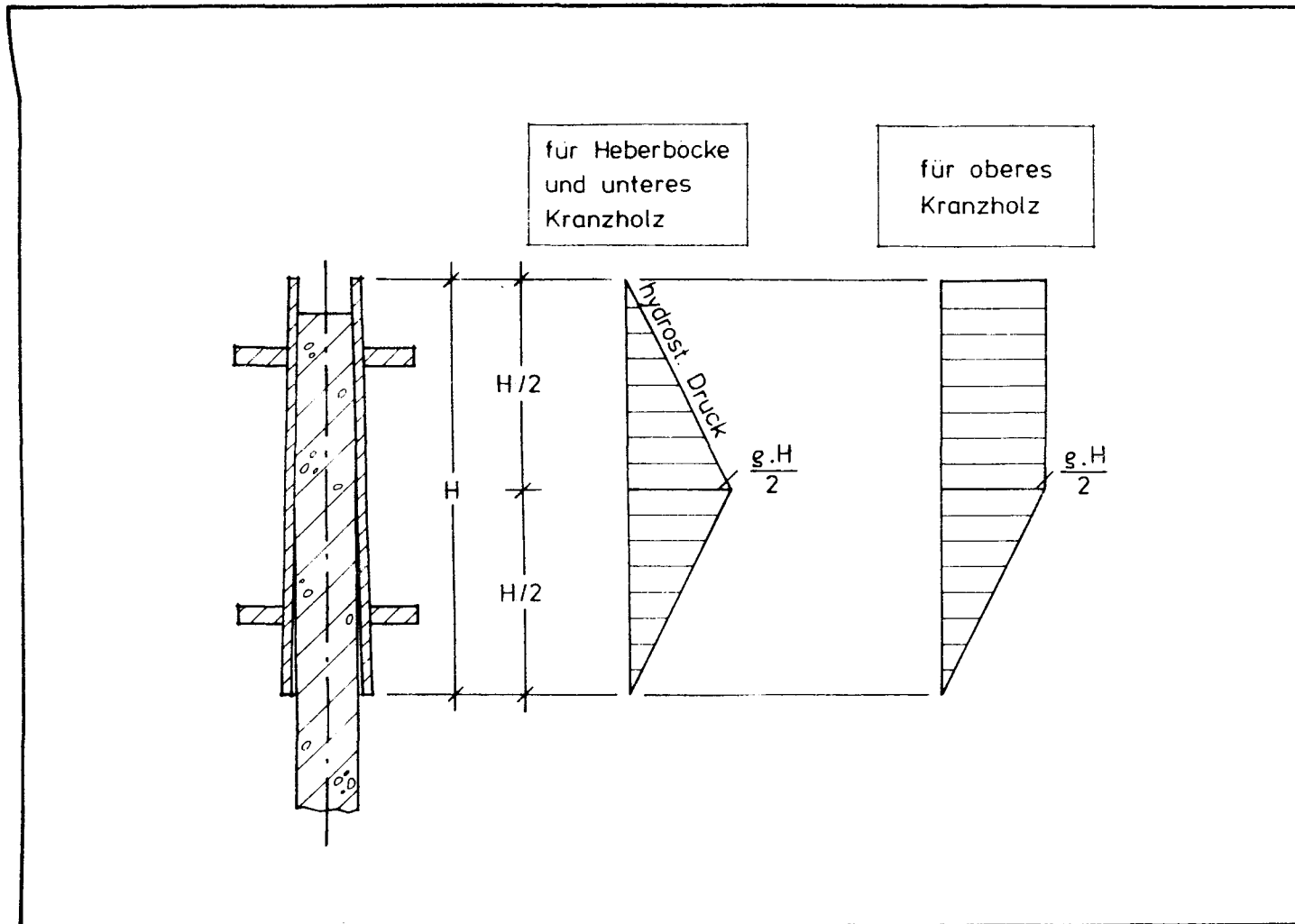


Bild 113: Aus den Baustellenmessungen abgeleiteter Vorschlag für den Ansatz des Schalungsdruckes zur Bemessung der Gleitschalung

Schalungsdruck	Baustellenmessung (99-%-Fraktilwerte) [kN/m]	rechn. Ansatz gem. Bild 113 [kN/m]
auf oberes Kranzholz	5,6	5,28
auf unteres Kranzholz	5,3	8,64
gesamt	6,4	9,92

Tabelle 15: Vergleich der gemessenen Schalungsdrücke mit dem empfohlenen Rechenansatz zur Bemessung der Gleitschalung

Ein gegenüber den Messungen höherer Ansatz des Schalungsdruckes auf das untere Kranzholz scheint erforderlich, da die auf der Baustelle in Bremen verwendete Gleitschalung eine ungewöhnlich hohe Lage des unteren Kranzholzes aufwies (Bild 23). Es kann angenommen werden, daß bei tiefer liegendem Kranzholz die aus Zwängungen (beispielsweise bei Schiefstellung der Schalung) resultierende Belastung wesentlich größer wird, als bei den Baustellenmessungen festgestellt wurde.

Die Auswertung der Baustellenmessungen ergab einen Abstand der Resultierenden von 80 cm (99-%-Fraktilwert) von Oberkante Schalung. Dagegen wird gem. Lastansatz nach Bild 113 der Abstand nur zu $H/2$ bestimmt. Da der empfohlene Lastansatz jedoch einen gegenüber den Messungen höheren Gesamt-Schalungsdruck erbringt, wird das für die Bemessung der Heberböcke (Bemessungsschnitt ist die Ecke zwischen Stiel und

Quertraverse) maßgebende Moment durch die Lasten gem. Bild 113 gut den Meßwerten angenähert. Dabei muß auch berücksichtigt werden, daß die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens der aus den Baustellenmessungen abgeleiteten Werte von maximalem Schalungsdruck und maximalem Abstand der Resultierenden vom oberen Schalungsrand sicher äußerst gering ist.

In engem Zusammenhang mit der Größe der für die Bemessung der Schalung anzusetzenden Lasten steht die Frage des einzuhaltenden Sicherheitsabstandes gegen Bruch der Werkstoffe. Unter Berücksichtigung der Tatsachen, daß

- es sich bei der Schalung um einen Baubehelf handelt,
- ein großer Anteil der gemessenen Lasten aus Zwängungen resultiert,
- die Schalung während des Bauvorgangs ständig durch Fachpersonal überwacht wird, das beispielsweise ungewöhnlich große Durchbiegungen sicher bemerken wird, und
- Versagen einzelner Teile der Schalung nur geringen Schaden am Bauwerk selbst, höchstwahrscheinlich keinen Personenschaden hervorrufen wird,

scheint eine Verringerung des üblichen Sicherheitsbeiwertes (bzw. eine Erhöhung der in den Normen angegebenen zulässigen Spannungen) vertretbar und angemessen. Ohne weitere Baustellenmessungen, die Aufschluß über die Streubreite der auftretenden Belastungen und deren Häufigkeit liefern können, ist derzeit jedoch die Angabe einer konkreten Zahl für den erforderlichen Sicherheitsbeiwert bzw. die zul. Versagenswahrscheinlichkeit nicht möglich.

Der zur Bemessung der Gleitschalung vorgeschlagene Ansatz des Schalungsdruckes (nach Bild 113) ergibt zwar höhere Werte als nach ACI 347-78 (Bild 3), jedoch deutlich geringere als nach dem CIRIA-Report 108 (Bild 4) oder den französischen und belgischen Gleitbauempfehlungen (Bild 5). Die Größenordnung der empfohlenen Werte für den Schalungsdruck stimmt weitgehend mit den Ergebnissen der Messungen von Steinecke, Prokopowicz und Bach sowie Reichverger und Jaegermann überein (Bilder 6 und 8), jedoch konnte die von diesen Autoren (in Laborversuchen) gefundene Schalungsdruckverteilung durch die Baustellenmessungen nicht bestätigt werden. Die nach den eigenen Vorschlägen ermittelten Schalungsdrücke liegen etwas höher als die Werte des Vorschlags von Hermann /11/.

6. Übertragung der Ergebnisse der Reibungsversuche auf Baustellenbedingungen

Beim Drehen der Versuchskörper ist die Winkelgeschwindigkeit der von der Drehachse weiter entfernten Bereiche der Berührungsfläche Beton/Schalungsmaterial größer als im Bereich der Achse. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, daß in randnahen Bereichen der Versuchskörper bereits der Haftverbund gelöst war, während um die Achse herum noch Verbund herrscht. Diese Tatsache erschwert die rechnerische Übertragung der Meßwerte der Reibkräfte auf Baustellenbedingungen.

Darüber hinaus muß beachtet werden, daß die Höhe, in der sich der Beton in der Gleitschalung (infolge der konischen Form der Schalung) von der Schalungsoberfläche löst, nicht bekannt ist. Außerdem ist der Beton der zu verschiedenen Zeiten eingebrachten Schichten unterschiedlich alt, wird also auch unterschiedliche "Verbundeigenschaften" zeigen, die sich nicht quantifizieren lassen.

Es wird daher eine direkte "Eichung" der Versuchsergebnisse an Meßwerten der Schalungsreibung einer Umrechnung über wirksame Haftspannungen vorgezogen. Dafür geeignet ist der Kurvenparameter C gemäß Gleichung (8), da er ausreichend genau direkt aus den Versuchsergebnissen bestimmt werden kann und wahrscheinlich weitgehend unabhängig von der Temperatur des Betons ist. Unter Berücksichtigung der Geometrie der Versuchskörper (Bild 114) und bei Ansatz des Mittelwertes der Kurvenparameter $\bar{C} = 0,143$ der Versuche mit einer Mehrschichten-

platte als Schalhaut (Versuche Nr. 3 bis 14; Versuche 1 und 2 wegen geringen Zementgehalts nicht berücksichtigt) ergibt sich im Vergleich zu dem aus den Baustellenmessungen ermittelten 99-%-Fraktilwert der Schalungsreibung (für Ruhezeiten von ≤ 10 Minuten, vgl. Abschnitt 5) ein Umrechnungsfaktor von ~ 25 , d. h., die in den Bildern jeweils angegebene Reibkraft ist mit 25 zu multiplizieren, um die unter sonst gleichen Verhältnissen am Bauwerk auftretende Schalungsreibung zu ermitteln.

Damit kann für Baustellenbedingungen die zu erwartende Schalungsreibung (99-%-Fraktilwert) aus

$$F_v \sim 25 (A \cdot t \cdot e^{B \cdot t} + C) \quad (\text{Gl. 12})$$

bestimmt werden, wobei die Kurvenparameter A, B und C wie in Abschnitt 4.1 zu bestimmen sind; t ist dabei die Ruhezeit der Schalung (nach Einfüllen des Betons bzw. zwischen zwei Hüben) in Stunden.

Bei Ansatz einer gleichmäßig verteilten, in der Berührungsfläche Schalung/Beton überall gleichgroßen Schubspannung ergibt sich bei Beachtung der unterschiedlichen Abstände von Resultierenden der Reibung und Zugkraft von der Drehachse (Bild 114) bei dem vorgeschlagenen Maßstabsfaktor rechnerisch eine Höhe des "Ablösepunktes" - an dem sich der Beton von der Schalung löst - von 0,89 m (von Oberkante Schalhaut). Dies ist eine plausible Größenordnung, die im Bereich der Meßwerte von Rödiger /18/ (vgl. Abschnitt 2.1) liegt, und bestätigt damit den vorgeschlagenen Maßstabsfaktor.

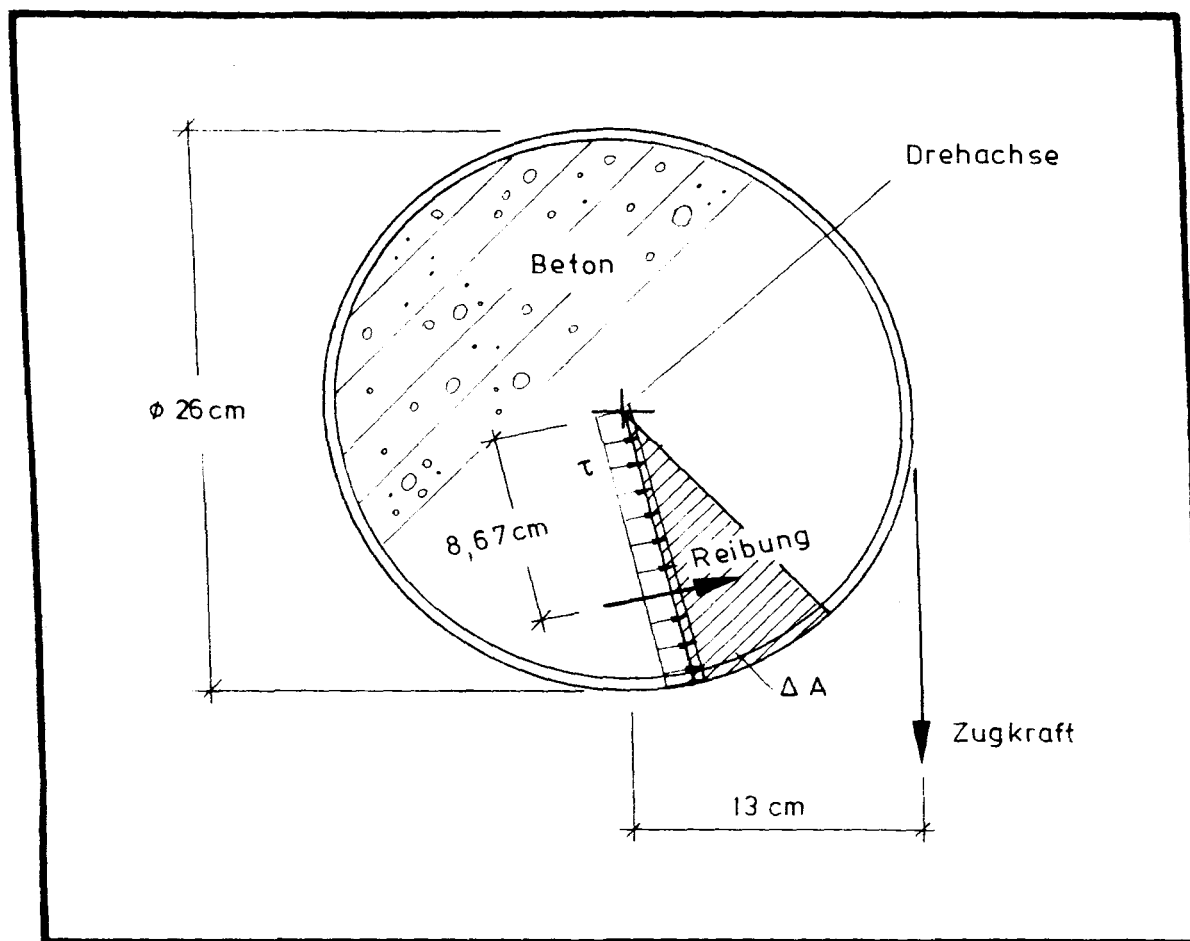


Bild 114: Grundrißabmessungen der Versuchskörper der Reibungsversuche,
vermutetes Kräftespiel

7. Empfehlung zum Ansatz der Größe der Schalungsreibung bei Gleitschalungen

Der aus den Ergebnissen der Baustellenmessungen bestimmte 99-%-Fraktilwert der Schalungsreibung von 4,0 kN/m stimmt genau mit dem Wert (400 kp/m) überein, den Steinecke, Prokopowicz und Bach /25/ als Ergebnis ihrer Messungen für eine wasserundurchlässige oberflächenvergütete Schalhaut vorschlugen.

Wie in Abschnitt 6 bereits gezeigt, können mit einem Maßstabfaktor von ~ 25 die Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung der Haftreibungskräfte direkt auf Baustellenbedingungen übertragen werden.

Beispielsweise wird danach bei Verwendung einer Schalung aus einer Mehrschichtenplatte, Zement PZ 35 F, rundkörnigen Zuschlägen und einer Betontemperatur von 21 bis 22 ° C nach einer Ruhezeit der Schalung von etwa 1 Std. die zu erwartende Schalungsreibung

$$p_v = 25 \cdot 0,2 = 5 \text{ kN/m Schalung}$$

betragen, wobei 25 den Maßstabsfaktor darstellt und der Wert von 0,2 den Ergebnissen des Versuchs Nr. 4 (Bild 29) entnommen ist. Bei sonst gleichen Bedingungen, jedoch Holzbrettern als Schalung, wird die Schalungsreibung

$$p_v = 25 \cdot 0,3 = 7,5 \text{ kN/m Schalung}$$

betragen (Versuch Nr. 14, Bild 39). Dies ist exakt der gleiche Wert, den Steinecke, Prokopowicz und Bach zur Bemessung der Gleitschalung

als maximale Schalungsreibung bei Verwendung einer Holzschalung vorgeschlagen haben /25/. Für andere als in den Reibungsversuchen untersuchte Kombinationen von Schalungsmaterial und Betonzusammensetzung kann die zu erwartende Größe der Schalungsreibung aus der für den zeitabhängigen Verlauf der Schalungsreibung angesetzten Gleichung (5) nach Abschnitt 4.1 unter Berücksichtigung des Maßstabsfaktors nach Abschnitt 6 ermittelt werden. Um zu einer baupraktisch sinnvollen Berücksichtigung zu kommen, die auch Schalungsverschmutzung und -verschleiß angemessen erfaßt, sollte dabei zwischen

sehr glatter Schalung

$(\sqrt{\mu} \sim 0,15)$

- nicht abgenutzte Mehrschichtenplatte mit glatter Beschichtung
- Stahlblech
- rostfreies Stahlblech (V2A)
- PTFE

glatter Schalung

$(\sqrt{\mu} \sim 0,25)$

- Mehrschichtenplatte
- abgenutzte Bleche

rauher Schalung

$(\sqrt{\mu} \sim 0,40)$

- Holzbretter, neu

sehr rauher Schalung

$(\sqrt{\mu} \sim 1,20)$

- stark abgenutzte Holzbretter

unterschieden werden. Bild 81 zeigt den aus den

Versuchen abgeleiteten, für die rechnerische Ermittlung der Schalungsreibung vorgeschlagenen Zusammenhang zwischen Schalungsrauigkeit und Kurvenparameter C (vgl. auch Bild 80).

Damit ergibt sich folgender Rechengang zur Ermittlung der Schalungsreibung:

- Bestimmung von

$$\eta_T = 0,05 T + 0,25 \quad (\text{Gl. 7})$$

mit T = Betontemperatur bei Anmischen [$^{\circ}\text{C}$].

- Ermittlung von

$$A = \eta_T (a_1 + a_2), \quad (\text{Gl. 10})$$

wobei a_1 Bild 84 zu entnehmen ist und a_2 nach Abschnitt 4.1, Seite 60, bzw. Bild 85 bestimmt wird.

- Ermittlung von

$$B = \eta_T [(b_1 + b_2) \cdot b_3] \quad (\text{Gl. 11})$$

b_1 ist Bild 89, b_3 dem Bild 90 zu entnehmen. b_2 beträgt bei Zugabe von Steinkohle-Flugaschen - 0,05 bis - 0,10; bei Verwendung von Zusatzmitteln kann der Wert ggf. abgeschätzt werden (vgl. Abschnitt 4.1).

- Ermittlung von

$$C = 0,10 + 0,25 \sqrt{\mu}, \quad (\text{Gl. 8})$$

wenn die Schalungsrauigkeit gemessen wurde (μ in mm).

Bei Verwendung gebrochenen Korns (Splitt) als Zuschlag und/oder besonders fein gemahlener Zemente wird C aus

$$C = 0,15 + 0,25 \sqrt{\mu} \quad (\text{Gl. 9})$$

bestimmt.

Für übliche Schalungsmaterialien
ist eine Abschätzung des Wertes C
aus Bild 80 möglich.

- Berechnung der zu erwartenden Größe
der Schalungsreibung aus

$$p_v = 25 (A \cdot t \cdot e^{B \cdot t} + C) \quad (\text{Gl. 12})$$

mit p_v = Schalungsreibung je m
Schalungslänge [kN/m]

$e = 2,7183$ (Basis der natürl.
Logarithmen)

und

t = Zeit zwischen zwei Bewe-
gungen der Schalung bzw.
zwischen Einfüllen des
Betons und Anfahren der
Gleitschalung [h].

An zwei Beispielen soll die Anwendung des vor-
geschlagenen Rechenverfahrens gezeigt werden.

Beispiel 1:

Schalung Mehrschichtenplatte

Betontemperatur 15°C

Zement PZ 35 F

Ruhezeiten zwischen zwei Hubvorgängen ≤ 10 ' "

$$\eta_T = 0,05 \cdot 15 + 0,25 = 1,0$$

$$a_1 = 0,02 \quad (\text{Bild 84})$$

$$a_2 = 0 \quad (\text{Bild 85})$$

$$A = 1,0 \cdot (0,02 + 0) = 0,02$$

$$\begin{aligned}b_1 &= 0,25 \quad (\text{Bild 89}) \\b_2 &= 0 \quad (\text{Abschnitt 4.1, Seite 61}) \\b_3 &= 1,4 \quad (\text{Bild 90}) \\B &= 1,0 [(0,25 + 0) \cdot 1,4] = 0,35\end{aligned}$$

$$C = 0,16 \quad (\text{Bild 80})$$

$$t = 10/60 = 0,167 \text{ [h]}$$

zu erwartende Schalungsreibung

$$\begin{aligned}p_v &= 25 (0,02 \cdot 0,167 \cdot e^{0,35 \cdot 0,167} + 0,16) = \\&= 4,08 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Beispiel 2:

Schalung Holzbretter

Betontemperatur 20°C

Zement PZ 45 F, Zuschläge Splitt, Füllerzusatz.

Zeit zwischen Einfüllen des Betons und Anfahren der Schalung 2 h 30 '.

$$\eta_T = 0,05 \cdot 20 + 0,25 = 1,25$$

$$\begin{aligned}a_1 &= 0,04 \quad (\text{Bild 84}) \\a_2 &= 0,005 \quad (\text{Bild 85}) \\A &= 1,25 (0,04 + 0,005) = 0,0563\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}b_1 &= 0,40 \quad (\text{Bild 89}) \\b_2 &= - 0,10 \quad (\text{Abschnitt 4.1, Seite 61}) \\b_3 &= 0,75 \quad (\text{Bild 90}) \\B &= 1,25 [(0,40 - 0,10) \cdot 0,75] = 0,281\end{aligned}$$

$$C = 0,25 \quad (\text{Bild 80})$$

$$t = 2,5 \text{ [h]}$$

zu erwartende Schalungsreibung

$$\begin{aligned} p_v &= 25 (0,0563 \cdot 2,5 \cdot e^{0,281 \cdot 2,5} + 0,25) = \\ &= 13,35 \text{ kN/m.} \end{aligned}$$

Auf die beschriebene Art rechnerisch ermittelte Werte der Schalungsreibung sind durch die Versuche bis zu einem Zeitraum von etwa 7 Stunden abgesichert. Diese Zeit reicht in der Baupraxis aus, um erstmalig die Schalung zu füllen und mit dem Gleiten zu beginnen. Arbeitsunterbrechungen während des Gleitens sollten ohnehin wesentlich kürzer gehalten werden. Gleichung (12) ist nicht geeignet, um nach planmäßigen oder unplanmäßigen langen Unterbrechungen des Gleitvorgangs (beispielsweise nach einer Unterbrechung der Arbeiten über das Wochenende) die dann beim erneuten Anfahren der Gleitschalung auftretende Schalungsreibung zu ermitteln.

8. Notwendigkeit weiterer Forschung

Die Versuche zur Ermittlung der Reibwerte wurden jeweils nur einmal für eine bestimmte Kombination von Beton und Schalungsoberfläche durchgeführt. Dadurch sind viele Aussagen dieses Versuchsberichtes häufig nur auf einen einzigen Versuchswert abgestützt, in Anbetracht der erkennbar nicht geringen Streuung der Werte höchst unbefriedigend. Es wäre wünschenswert, wenn die Reibungsversuche noch ein- bis zweimal wiederholt werden könnten, um durch Mittelwertbildung der Versuchsergebnisse die Aussagen besser absichern zu können und außerdem Zahlenangaben für die Streubreite der Werte zu erhalten.

In der Literatur fanden sich kaum Angaben über den Temperatur- und Erhärtungsverlauf des Betons in jungem Alter; der Temperatureinfluß auf die zeitliche Entwicklung der Reibwerte mußte daher aus den eigenen Versuchen relativ grob abgeschätzt werden. Es ist aus anderen Arbeiten bekannt, daß Zemente unterschiedlicher Herkunft trotz gleicher Bezeichnung stark unterschiedliches Erstarrungsverhalten und unterschiedlichen Erhärtungsverlauf in den ersten Stunden nach Anmischen zeigen können. Grundsatzversuche, in denen dieses Verhalten bei unterschiedlicher Zusammensetzung der Zemente abgeklärt wird, scheinen - nicht nur für Zwecke der Anwendung im Gleitbau - dringend nötig.

Die "Eichung" der Laborversuche an Baustellenbedingungen konnte nur über die in /25/ beschriebenen Versuche und die eigenen Baustellenmessungen erfolgen. Dies ist äußerst unbe-

friedigend. Es sollten weiter Messungen der Schalungsreibung bei Bauausführungen durchgeführt werden, wobei unterschiedliche Schalungsmaterialien unbedingt zu berücksichtigen sind.

Die Messung des Schalungsdruckes an der Baustelle zeigte, daß infolge von Zwängungen die Belastung der Schalung im oberen Bereich wesentlich größer ist, als aus Versuchswerten mit Wandteilen oder aus theoretischen Ansätzen für den Schalungsdruck ermittelt. Lastannahmen für den Betondruck auf die Gleitschalung sollten daher aus weiteren Baustellenmessungen abgeleitet werden. Theoretische Ansätze, bei denen versucht wird, über eine "Seitendruckziffer" und "Reibungsbeiwerte" rechnerisch Schalungsdruck und -reibung bei Gleitschalungen zu bestimmen, scheinen dagegen kein erfolgversprechender Weg zur Festlegung von Bemessungslasten zu sein.

9. L i t e r a t u r

- /1/ F. Böhm:
Das Arbeiten mit Gleitschalungen.
3. Auflage, Berlin 1958.
- /2/ J. Braun, G. Forner und S. Röhling:
Rationelle Schaltechnik;
Band 2: Gleitschalungen.
Berlin (Ost) 1978.
- /3/ N. J. Carino, H. S. Lew, C. K. Volz:
Early Age Temperature Effects on Concrete
Strength Prediction by the Maturity Method.
ACI-Journal, März - April 1983,
Seiten 93 - 101.
- /4/ C. A. Clear und T. A. Harrison:
Concrete pressure on formwork.
Ciria-Report 108, London 1985.
- /5/ Commission Technique "Coffrages Glissants":
Coffrages Glissants.
Annales de L'Institut Technique du Batiment
et des Travaux Publics, Nr. 341,
Juli/August 1976, Seiten 77 - 100.
- /6/ P. D. Courtois u. a. (ACI-Committee 347):
Recommended Practice for Concrete Formwork
(ACI 347 - 78), ACI Journal Sept. 1977,
Seiten 397 - 434.
- /7/ Deutscher Beton-Verein:
"Merkblatt Gleitbauverfahren" (Fassung
Februar 1987); Erläuterungen zum "Merkblatt
Gleitbauverfahren". DBV-Merkblatt-Sammlung,
Ausgabe 1987, Seiten 305 - 327.

- / 8/ DIN 18 218:
Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen.
Ausgabe Sept. 1980.
- / 9/ W. Drechsel:
Die Gleitschalung.
Berlin 1950.
- /10/ S. Droese:
Untersuchungen zur Technologie des Gleit-
schalungsbaus.
TU Braunschweig, Institut für Baustoffe,
Massivbau und Brandschutz, Heft 64, 1985.
- /11/ M. Hermann:
Gleitbauweise im Stahlbetonbau.
TU Berlin, Fachgebiet Baubetrieb und
Baumaschinen, Mitteilungen Heft 7, 1984.
- /12/ M. K. Hurd:
Formwork for Concrete.
Special Publication No. 4, American
Concrete Institute, Detroit 1977.
- /13/ K. Kluge, G. Schmidt-Thrö, S. Stöckl und
H. Kupfer:
Versuche über das Verbundverhalten von
Rippenstählen bei Anwendung des Gleitbau-
verfahrens;
Teilbericht III: Ausziehversuche und Ver-
suche an Übergreifungsstößen.
Proben in Berlin bzw. Köln hergestellt.
DAfStb, Heft 378, Verlag Ernst & Sohn,
Berlin 1986, Seiten 63 - 109.

- /14/ K. Kordina und S. Droese:
Korrosionsschutz von Bauwerken, die im
Gleitschalungsbau errichtet wurden.
DAfStb, Heft 356, Verlag Ernst & Sohn,
Berlin 1984.
- /15/ Z. Reichverger:
Interaction of casting and mould surfaces
in slip-form technology.
Magazine of Concrete Research: Vol. 31,
No. 108, Sept. 1979, Seiten 171 - 176.
- /16/ Z. Reichverger und C. Jaegermann:
Optimal regime in slip-form concreting.
Matériaux et Constructions, Vol. 13 -
Nr. 74, 1980, Seiten 109 - 113.
- /17/ Z. Reichverger und C. Jaegermann:
Friction and pressure of concrete in slip-
form concreting.
RILEM International conference on concrete
of early ages, Berichtsband, Seiten 247 -
253, Paris 1982.
- /18/ M. Rödiger:
Der Einfluß von Gleitschalungsausrüstung
und Gleitprozeß auf den Waddickenverlauf
und andere ausgewählte Bauwerksabmessungen.
Diss. TH Magdeburg 1985.
- /19/ G. Schmidt-Thrö und S. Stöckl:
Versuche über das Verbundverhalten von
Rippenstählen bei Anwendung des Gleitbau-
verfahrens;
Teilbericht I: Ausziehversuche.
Proben in Utting hergestellt.
DAfStb, Heft 378, Verlag Ernst & Sohn,
Berlin 1986, Seiten 9 - 38

- /20/ F. Schmidt-Thrö, S. Stöckl und H. Kupfer:
Versuche über das Verbundverhalten von
Rippenstählen bei Anwendung des Gleitbau-
verfahrens;
Teilbericht II: Versuche zur Bestimmung
charakteristischer Betoneigenschaften bei
Anwendung des Gleitbauverfahrens.
DAfStb, Heft 378, Verlag Ernst & Sohn,
Berlin 1986, Seiten 39 - 61.
- /21/ M. R. Selfslagh u. a.:
Les Coffrages Glissants.
Centre Scientifique et Technique de la
Construction, Note d'Information 123,
Brüssel 1978.
- /22/ M. Specht: Die Belastung von Schalung und
Rüstung durch Frischbeton.
Werner-Verlag, Düsseldorf 1973.
- /23/ M. Specht: Der Frischbetondruck nach
DIN 18 218 - die Grundlagen und wichtig-
sten Festlegungen.
Bautechnik 8/1981, Seiten 253 - 261.
- /24/ M. Specht: Theorie des Frischbetondrucks -
gegenwärtiger Stand und ungeklärte Probleme.
Bautechnik 3/1987, Seiten 73 - 78.
- /25/ M. Steinecke, J. Prokopowicz und W. Bach:
Experimentelle Untersuchung des Schalungs-
drucks und der Schalungsreibung bei Gleit-
schalungen.
Bauplanung - Bautechnik 7/1964, S. 342 - 344
8/1964, S. 395 - 397
9/1964, S. 446 - 449.

/26/ S. Stöckl, G. Schmidt-Thrö und K. Kluge:
Versuche zum Verbundverhalten bei Anwendung des Gleitbauverfahrens.

Beton- und Stahlbetonbau 11/1986,
Seiten 287 - 291.

/27/ TGL 118-0358:

Stahlbeton-Wandbau mit Gleitschalung.
Ministerium für Bauwesen, Berlin - Ost,
1962.

DBBOR: 447 ✓

14. Juli 1987